В. Ю. ЛОМОНОСОВ и К. М. ПОЛИВАНОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Издание девятое, переработанное

Одобрено
Ученым советом Государственного комитета
Совета Министров СССР
по профессионально-техническому образованию
в качестве учебного пособия
для ремесленных училищ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1962 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-3-2

Основные понятия об элементах электрической цепи и о расчете простых цепей постоянного и переменного тока. Общее описание физических процессов, происходящих в электрическом и магнитном полях. Принципы действия электрических машин, трансформаторов и линий передачи энергии. Основы электрических измерений и понятие об опасности токов высокого напряжения.

Пособие для электромонтеров.

Ломоносов Всеволод Юрьевич, Поливанов Константин Михайлович
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Редактор *И. В. Антик* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 19/II 1960 г. Подписано к печати 23/II 1962 г.
Т-00151. Бумага 84 × 108 1/32 20 печ. л Уч.-изд. л. 22,6
Тираж 150 000 экз. (2-й завод 15 001 — 100 000) Цена 89 коп Заказ 2101.

Отпечатано с матриц типографии Госэнергоиздата в типографии им. Котлякова Госфиниздата СССР. Ленинград, Садовая, 21. Зак. 621.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга предназначается для малоподготовленных читателей, знакомых по своей практической работе с электрическим током.

Читатель найдет в этой книге начальные сведения по электричеству, необходимые для понимания последующих руководств по специальным разделам электротехники.

Необходимо, однако, иметь в виду, что сведения, сообщаемые в данной книге, недостаточны для полного понимания электрических явлений. Это — только начало. Кто хочет по-настоящему овладеть электротехникой, тот должен заниматься своим общим образованием. Надо изучать алгебру, геометрию, физику, механику. Тогда можно гораздо основательнее познакомиться с теорией, необходимой для сознательной работы в области электротехники.

В новом издании предлагаемой книги расширены разделы, посвященные физическим явлениям, на которых основана современная электротехника.

Кроме авторов, в переработке и написании ряда разделов приняли участие Ю. М. Шамаев и М. Г. Витков (в основном гл. 6—9) и М. К. Поливанов (гл. 1). Ряд ценных указаний был сделан Н. Н. Мансуровым. За участие в работе авторы приносят им свою благодарность.

В. Ю. Ломоносов
К. М. Поливанов

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

МАГНИТЫ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЖЕЛЕЗО В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ

ГЛАВА ПЯТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ГЛАВА ВОСЬМАЯ
ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ
ТРАНСФОРМАТОРЫ

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ОПАСНОСТЬ ОТ ТОКОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

О световых явлениях мы судим по тому раздражению, которое испытывает наш глаз под действием световых волн. Звук воспринимается нашим ухом. Тепло осязается нашей кожей. Но органов чувств, которые позволили бы нам видеть, слышать или осязать электрические явления, у нас нет (если не говорить о неприятном ощущении, вызываемом током, когда он проходит по нашему телу). В этом — общепризнанная трудность для каждого приступающего к изучению электротехники.

Предметом электротехники является техническое применение электричества. С этими применениями мы встречаемся буквально на каждом шагу, и с каждым днем они становятся все разнообразнее. Электричество проникло во все стороны нашей личной и общественной жизни. Электрическое освещение, электрические двигатели, электрический транспорт, электрические печи, электрические виды связи прочно вошли в наш быт.

Электрификация Советского Союза неразрывно связана с именем В. И. Ленина. Формула Ленина «Коммунизм — это есть советская власть плюс электрификация всей страны» дает ключ к пониманию задач, которые стоят перед электрификацией нашей Родины. Исчерпывающая характеристика этих задач дана Лениным на III съезде комсомола в 1920 г.

«Мы знаем, что коммунистического общества нельзя построить, если не возродить промышленности и земледелия, причем надо возродить их не по-старому. Надо возродить их на современной, по последнему слову науки построенной, основе. Вы знаете, что этой основой является электричество, что только, когда произойдет электрификация всей страны, всех отраслей промышленности и земледелия, когда вы эту задачу освоите, только тогда вы для себя смо-

жете построить то коммунистическое общество, которого не сможет построить старое поколение. Перед вами стоит задача хозяйственного возрождения всей страны, реорганизация, восстановление и земледелия, и промышленности на современной технической основе, которая покоится на современной науке, технике, на электричестве. Вы прекрасно понимаете, что к электрификации неграмотные люди не подойдут, и мало тут одной простой грамотности. Здесь недостаточно понимать, что такое электричество: надо знать, как технически приложить его и к промышленности, и к земледелию, и к отдельным отраслям промышленности и земледелия. Надо научиться этому самим, надо научить этому все подрастающее трудящееся поколение». [1]

Развивая эту мысль, Н. С. Хрущев в своем выступлении на Всесоюзном совещании по энергетическому строительству сказал:

«Экономическая сторона строительства коммунизма, — то, что Ленин выразил словами «плюс электрификация всей страны», приобретает все большее значение, я бы сказал, решающее значение на данном этапе.

Что такое электрификация всей страны? Это — основа основ развития народного хозяйства. Без осуществления электрификации нельзя на современном этапе успешно и быстро двигать вперед и тяжелую индустрию и строительство, транспорт и сельское хозяйство, производство товаров народного потребления, нельзя поднять культуру производства и быта. Электрифицировать всю страну — это значит дать могучую энергию новому обществу, ускорить развитие его производительных сил. Общество, в котором власть принадлежит рабочему классу, трудовому народу, впервые получает возможность развивать свою экономику по единому плану, в интересах народа».

Выступая на XXII съезде с докладом о Программе Коммунистической партии Советского Союза, Н. С. Хрущев указал пути развития советской электроэнергетики в течение ближайших 2 десятилетий:

«В течение двадцати лет предстоит построить сто восемьдесят мощных гидроэлектростанций, около двухсот районных тепловых электростанций мощностью до трех миллионов киловатт каждая, а также двести шестьдесят крупных теплоэлектроцентралей.

В Восточной Сибири, помимо завершения Братской и

---

[1] В. И. Ленин, Собрание сочинений, т. 31, стр. 264

Красноярской ГЭС, намечается построить на Ангаре и Енисее к 1980 году еще несколько таких мощных гидроэлектростанций, как Саянская, Усть-Илимская, Богучанская, Енисейская, Осиновская, а также Нижне-Тунгусская. Мощность каждой из них превысит четыре миллиона киловатт.

Кроме того, здесь же на базе углей Канско-Ачинского бассейна будут созданы две группы высокоэкономичных сверхмощных тепловых электростанций: в районе Красноярска — Итатско-Боготольская и в районе Канск — Тайшет — Ирша-Бородинская по три миллиона киловатт и больше каждая электростанция.

В Средней Азии будут возведены крупные гидроэлектростанции, имеющие комплексное значение как для развития электрификации, так и для ирригации. Среди этих электростанций Нурекская и Рогунская на реке Вахш, Токтогульская и Тогузтороуская на реке Нарын. В Казахстане появится ряд крупных электростанций, в том числе Иртышская энергетическая группа.

Сооружением Саратовской, Нижне-Волжской и Чебоксарской ГЭС и двух электростанций на Каме будет завершен Волжско-Камский каскад гидроэлектростанций. В единую энергосистему Европейской части страны будет давать свою энергию Нижне-Обская ГЭС мощностью до шести миллионов киловатт. Кроме того, намечается построить ряд мощных тепловых станций в районе Саратова, Волгограда, Горького, в районе Куйбышев — Уфа — Оренбург.

Мощные тепловые электростанции возникнут в Центральном и Центрально-черноземном районах Европейской части Союза, к югу и на северо-восток от Москвы, на Украине в районе Киева, Кировограда и Николаева, в Донбассе, в Латвии и Белоруссии. Развитие энергетики Кавказа будет базироваться на использовании гидроресурсов и других источников энергетики.

В результате осуществления плана будут решены такие важные проблемы, как проблемы Большой Волги и Большого Днепра Это, конечно, потребует немалых капиталовложений. Но они будут возмещены в сравнительно короткий срок. Подсчеты показывают, что выработка дешевой электроэнергии на волжско-камских и днепровских гидроэлектростанциях увеличится почти вдвое. Свыше двадцати миллионов гектаров засушливых земель Заволжья и Юга будут застрахованы от случайностей погоды, станет возможным осушить более четырех миллионов гектаров заболоченных земель Полесья и Прибалтики».

Такие темпы строительства, невиданные ни у нас, ни за рубежом, приведут к увеличению в несколько раз выработки электроэнергии. В Программе КПСС записано:

«Электрификация, являющаяся стержнем строительства экономики коммунистического общества, играет ведущую роль в развитии всех отраслей народного хозяйства, в осуществлении всего современного технического прогресса. Поэтому необходимо обеспечить опережающие темпы производства электроэнергии. План электрификации страны предусматривает: увеличение в ближайшее десятилетие электровооруженности труда в промышленности почти в три раза; широкое развертывание на базе дешевой электроэнергии электроемких производств; осуществление массовой электрификации транспорта, сельского хозяйства, быта городского и сельского населения. Во втором десятилетии электрификация всей страны будет в основном завершена.

Годовое производство электроэнергии должно быть доведено к концу десятилетия примерно до 900—1000 миллиардов, а к концу второго десятилетия — до 2700—3000 миллиардов киловатт-часов. Для этого потребуется в течение двадцатилетия соответственно увеличить мощности электростанций, построить сотни тысяч километров высоковольтных магистральных и распределительных сетей во всех районах страны. Будет создана единая энергетическая система СССР, располагающая достаточными резервами мощностей, позволяющая перебрасывать электроэнергию из восточных районов в Европейскую часть страны и связанная с энергосистемами других социалистических стран.

По мере удешевления производства атомной энергии развернется строительство атомных электростанций, особенно в районах с недостатком других источников энергии, расширится применение атомной энергии в мирных целях в народном хозяйстве, медицине, науке».

Новейшая техника предъявляет высокие требования к рабочим и техническому персоналу. Непрерывно совершенствовать свои знания — долг трудящихся нашей страны.

Наша книга призвана оказать помощь в изучении основ электротехники.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

НАЧАЛЬНЫЕ ПОНЯТИЯ

1-1. ЭНЕРГИЯ И РАБОТА

Энергией называется способность совершать работу. При совершении работы энергия тратится. Так, мускулы руки, поднимая груз, совершают работу. На это человек затрачивает некоторую энергию.

Пример. Механизм подъемника также совершает работу при подъеме груза. Но кран поднимает груз только тогда, когда его лебедки приведены в движение. Двигатель совершает работу над механизмом крана и при этом передает ему часть своей энергии в форме работы, совершенной над ним. Но если это двигатель внутреннего сгорания, то его рабочий процесс должен все время поддерживаться новыми порциями топлива (бензина, керосина, соляровых масел); если же это электрический двигатель, то он работает только тогда, когда он включен в сеть и через его обмотки течет электрический ток.

Законы преобразования энергии. Что же в нашем примере окажется первоначальным источником энергии, совершающим работу?

Ответ ясен: горючее в первом случае, электрический ток — во втором.

Положение таково:

Энергия не является постоянным свойством тела: тело может терять ее и приобретать вновь.

Приобретение энергии и ее потеря происходят при некоторых вполне определенных условиях. Каковы же эти условия? О первом мы сказали в самом начале:

Энергия тратится при совершении работы.

Второе условие таково:

Энергия приобретается телом, когда над ним совершается некоторая работа.

Например, поднятый груз обладает энергией. За этими положениями угадывается новое.

Энергия не уничтожается и не создается вновь; она только переходит от одного тела к другому и при этом может существовать в разных формах.

Последние слова выражают один из основных законов природы. Закон сохранения энергии лежит в основе физической науки, а следовательно, в конечном итоге и в основе всех технических приложений.

Превращения энергии. Все сказанное — это результат обобщения прямых наблюдений и опытов. Для их подтверждения и уяснения подробно разберем первый случай нашего примера.

Бензин, сгорая, превращается в значительно большее по объему количество газа. Сжатый в маленьком объеме газ, расширяясь, толкает поршень цилиндра и при этом совершает работу. Следовательно, бензин обладал энергией, которая в процессе сгорания перешла в энергию упругости сжатого газа. Расширяющийся газ совершил работу над поршнем, который он привел в движение. Тем самым он лишился способности совершать работу — потерял избыток энергии. Но движущиеся поршни приобрели энергию. Через систему лебедок и блоков эта энергия, уже преобразованная опять в форме энергии поступательного движения, доходит до крюка подъемника, который, двигаясь вверх, поднимает груз, т. е. совершает над ним работу (рис. 1-1).

Груз поднятый на некоторую высоту, оказывается сам носителем избытка энергии, так как, падая вниз, он может работать. Его энергия называется потенциальной или энергией положения в отличие от энергии, которой обладает движущееся тело,—кинетической или энергии движения.

Рассеяние энергии. Коэффициент полезного действия. Для проверки закона сохранения энергии необходимо измерять энергию и работу, которую может совершать обладающее ею тело. Достаточно измерить одну лишь работу, так как при совершении равных работ затрачивается равная энергия.

Положим, что мы измерили энергию бензина и энергию поднятого тела. При сравнении их мы заметим, что бензин, сгорая, мог совершить значительно бо́льшую работу, чем работа поднятия груза на ту высоту, на которую он поднят.

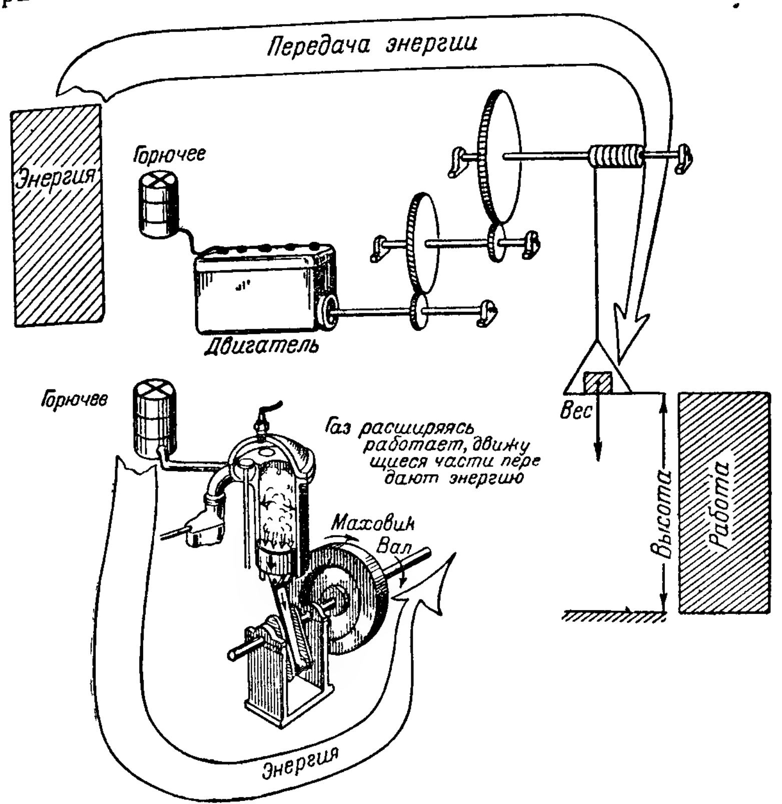


Рис. 1-1. Энергия топлива передается поднимаемому грузу. Каждое промежуточное звено работает и при этом передает свою энергию следующему звену.

Однако это кажущееся противоречие не опровергает основной закон сохранения энергии, а только подтверждает его. Вникнем глубже в этот процесс. Окажется, что отработавшие газы сгоревшего бензина, выброшенные в воздух, еще обладали некоторой энергией, которая ушла на нагревание воздуха. Дальше: все известно, что при трении тела нагреваются. Нагрелись из-за трения блоки крана На это тоже пошла энергия.

Вывод. Энергия рассеялась, т. е. пошла на совершение непродуктивных, бесполезных работ. Если мы учтем и рассеянную и полезно израсходованную энергию, мы получим в точности то же значение, которое получили, подсчитав энергию, выделенную при сгорании бензина.

Закон сохранения выполнен, но здесь мы столкнулись с другим очень важным явлением, которое тоже обладает характером закона природы:

Некоторая часть энергии теряется впустую (рассеивается).

В технике содержание этой закономерности выражает так называемый коэффициент полезного действия, т. е. отношение полезно затраченной энергии (перешедшей в полезную работу) ко всей энергии, затраченной в процессе:

$$\text{к. п. д.} = \frac{\text{полезно затраченная энергия}}{\text{вся энергия}}$$

или в буквах:

$$\text{к. п. д.} = \frac{W - W'}{W};$$

здесь W — полная энергия;
W' — рассеянная энергия.

Ясно, что к. п. д. всегда меньше единицы.

Измерение работы. Теперь обратимся к измерению энергии, или, что то же, к измерению совершаемой работы. Можно измерять работу, скажем, количеством сожженного бензина или потраченной электроэнергии. Однако в таком случае нам пришлось бы добавочно находить рассеянную энергию, что обычно сопряжено с большими трудностями.

Кроме того, двигатели могут быть самыми различными, а в таком случае мы не получим возможности единообразно измерять одну и ту же физическую величину. Последнее в любых измерениях очень важно. Поэтому естественно обратиться к последнему звену цепи преобразований и измерять работу поднятия груза на высоту.

Тогда мы увидим, что количество совершенной работы зависит от обоих условий сразу: и от величины груза и от высоты подъема. Зависимость такова: чем больше величина груза, тем больше работа, и чем больше высота подъема, тем также больше работа. Математически ясно, что такая зависимость от двух величин (называемая прямой пропорциональностью) выражается их произведением.

Но работа совершается не только при подъеме. Работа совершается также при движении вагонетки по рельсам или при вращении мельничного жернова. В этих случаях тело остается на прежней высоте, однако оно перемещается в пространстве. В общем случае место высоты занимает путь, а место груза (веса) — сила, которая может быть: силой тяжести, силой трения, силой инерции или любой другой.

Закон таков:

Работа измеряется произведением величины той силы, которая двигает тело, и длины пройденного пути.

Кратко:

$$\textit{работа} = \textit{сила} \times \textit{путь}$$

или, пользуясь буквами,

$$A = F \cdot l,$$

где A, F, l — принятые обозначения соответственно для работы, силы и пути.

Для того чтобы последняя формула была правильной, надо добавить, что в ней сила и путь должны быть направлены одинаково, так как только сила, совпадающая по направлению с путем, совершает работу. Если же сила направлена как-то иначе, то всегда можно разложить ее на части, из которых одна будет совпадать с направлением пути, а другая будет ему перпендикулярна. Можно показать, что сила, перпендикулярная, скажем, к направлению рельсов (т. е. направлению движения), не будет двигать вагонетки, а значит, не будет совершать работы.

Разложению поддается не только сила, но и путь. Стрела крана, поднимая и одновременно перенося груз, будет работать против силы тяжести только при подъеме, и работа определится не всем путем груза, а только той его составляющей, которая определит подъем.

Таким образом, измерение работы свелось к измерению длины (путь) и силы. Полагаем общеизвестным измерение пути и переходим к обсуждению понятия силы и способов ее измерения.

1-2. МАССА. СИЛА. УСКОРЕНИЕ.

Поднимая тело, мы прикладываем к нему силу, которая преодолевает силу притяжения к земле — силу тяже-

сти. Действие этой силы на свободное тело выражается в том, что тело падает на землю с равномерно увеличивающейся скоростью.

Приращение скорости, отнесенное к промежутку времени, за который оно произошло, называется ускорением:

$$\text{ускорение} = \frac{\text{скорость в конце} - \text{скорость в начале}}{\text{промежуток времени}}.$$

Если поезд, двигаясь равномерно-ускоренно, за 10 *сек* увеличил свою скорость с 7 до 12 *м/сек*, то его ускорение в это время было:

$$\frac{12\ м/сек - 7\ м/сек}{10\ сек} = 0{,}5\ м/сек^2.$$

Ускорение и сила. Ускорение, сообщаемое свободно падающему телу силой тяжести, почти неизменно во всех точках земного шара и составляет 9,81 *м/сек* за 1 *сек*, или 9,81 $м/сек^2$. Если приложить к телу другую силу, кроме силы тяжести, то его ускорение изменится, так как изменится действующая на него сила. Например, ускорение парашютиста, падающего с открытым парашютом, много меньше, чем 9,81 $м/сек^2$, так как на него, кроме силы тяжести, действует еще тормозящая сила сопротивления воздуха, которая вычитается из силы тяжести. На этом и основано применение парашюта: сопротивление воздуха раскрытому парашюту очень велико. Особенно наглядно это проявится при затяжном прыжке.

Если величина приложенной силы больше, чем сила тяжести, и направлена не к земле, как она, а от земли, то тело начнет подыматься с ускорением. Например, воздушный шар или груз, поднимаемый краном.

Измерение силы. Уже говорилось, что сила пропорциональна ускорению, т. е. чем больше ускорение тела, тем больше сила, вызывающая это ускорение.

Так же как путь может служить мерой совершенной работы при постоянной приложенной силе, так же ускорение тела может быть мерой силы, приложенной к нему. Но для этого нужно, чтобы тело было все время одно и то же, так как ясно, что если мы сообщим одинаковые ускорения пустой тележке и тележке с грузом, то в первом случае потребуется гораздо меньшая сила. Следовательно, вторым

сомножителем пропорциональности в нашей формуле для силы будет масса материи, которой сообщено ускорение, или просто масса:

сила = масса × ускорение.

Это основной закон механики, и он называется по имени впервые точно сформулировавшего его ученого вторым законом Ньютона (из трех основных законов, сформулированных им).

Масса. Наряду с законом сохранения энергии существует закон сохранения массы. Он говорит, что убыль массы одного тела может происходить только за счет увеличения массы другого или за счет дробления тела, а увеличение — только за счет превращения нескольких тел в одно тело или убыли массы другого тела.

Таким образом, *масса тела, есть мера содержания вещества в нем. Узаконенной в СССР единицей массы является килограмм. С очень большой точностью килограмм равен массе одного литра дистиллированной (очищенной) воды при температуре +4° стоградусной шкалы. Тысяча килограммов составляет тонну.*

Система МКС. Система единиц, включающая массу — «килограмм», называется МКС по первым буквам основных независимых единиц этой системы:

Метр (единица длины).

Килограмм (единица массы).

Секунда (единица времени).

Сила. В системе МКС единица силы — 1 ньютон.

Один ньютон (*н*) — это такая сила, которая сообщает ускорение 1 $м/сек^2$ (метр в секунду за секунду) массе в один килограмм.

Масса и вес. Мы предостерегаем читателя от путаницы между массой и весом (силой), так как в любом техническом или физическом расчете это приводит к ошибке.

Этой путанице способствует то, что единица массы и другая единица — единица силы носят одно название — килограмм.

Сила в 1 *кГ* * — это сила тяжести, действующая на массу в 1 *кг*, и, следовательно, она в 9,81 раза больше ньютона, так как сообщает массе в 1 *кг* ускорение 9,81 $м/сек^2$, а не 1 $м/сек^2$.

---

* Чтобы различить эти единицы говорят килограмм-сила и обозначают ее *кГ* и килограмм-масса (*кг*).

Вес — это сила тяжести, приложенная к массе, и его нельзя отождествлять с массой. Снаряд, отправленный с Земли на Луну, сохраняет неизменной свою массу, в то время как его вес изменится (как?).

1-3. ИЗМЕРЕНИЕ РАБОТЫ

Теперь вернемся к измерению работы. Мы установили (§ 1-1), что работа равна произведению силы и пути. В свою очередь (§ 1-2) сила равна произведению массы и ускорения. Но так как обычно мы легко можем измерить силу непосредственно, то формулой

$$A = F \cdot l,$$

пожалуй, чаще всего пользуются для подсчета работы.

Мы тянем тележку по рельсам. Пружинный динамометр (прибор для измерения силы) показывает, что приложена сила, равная 25 *н*, а прикладывая рулетку к рельсам между точкой начала и точкой конца, мы измеряем пройденный путь и находим, что он равен 4 *м*. Тогда совершенная работа будет:

$$25\ н \cdot 4\ м = 100\ ньютонометров = 100\ джоулей.$$

Так мы познакомились с единицей измерения работы.

Работа силы в один ньютон на пути в один метр называется джоулем (дж).

Однако джоуль — это очень малая единица работы. Взрослый человек, поднявшийся на одну ступеньку, совершает работу по подъему своего тела, равную 170 *дж*. Поэтому наравне с джоулем употребляется единица, в 1 000 раз бо́льшая, 1 килоджоуль. Положим теперь, что мы подняли массу в один килограмм на высоту одного метра. Мы совершили работу против силы тяжести, равной 9,81 ньютона, и она равна 9,81 *дж*.

С другой стороны, взяв за единицу силы 1 *кГ*, мы увидим, что именно такая сила была приложена к телу с массой 1 *кг* для преодоления земного притяжения и, таким образом, работа этой силы может быть принята равной 1 *кГ · м*:

Один килограммометр равен 9,81 джоуля.

Мы советуем всегда переводить килограмм-силу в ньютоны и килограммометры в джоули. Преимущество кило-

граммометров и сил, выраженных в килограммах, весьма призрачно. Они упрощают расчеты лишь в тех случаях, когда мы интересуемся силами тяжести и их работами. Но при переходе к любой другой силе пользование такой системой очень усложняет и запутывает всю картину. Происходит это потому, что за единичное ускорение выбрано ускорение силы тяжести 9,81 *м/сек²*. Последнее обстоятельство позволяет легко оперировать в области сил тяжести и вносит большие затруднения во всех остальных случаях.

Другие виды работы. Работа не обязательно связана с перемещением тел. Иными словами, работа не всегда бывает механической работой. Мы видели в первом параграфе, что энергия сожженного бензина перешла в механическую энергию и была истрачена в процессе работы поднятия груза. Эта же энергия могла быть употреблена, скажем, на согревание воды. А горячая вода могла снова отдать свою энергию какой-либо механической системе (с этим процессом мы сталкиваемся в паровых двигателях). Следовательно, при нагревании воды совершается некоторая работа. Такие примеры наводят на мысль о том, что тепловая энергия (или работа) может быть тоже подсчитана и измерена и, что очень важно, поддается сравнению с механической работой.

Мерой тепловой энергии служит количество теплоты, нагревающей массу воды в 1 грамм на 1° стоградусной шкалы. Такая единица называется калорией.

1 000 калорий составляет 1 килокалорию.

1 килокалория нагреет на 1° тысячу граммов воды или на 10° сто граммов воды.

Содержание энергии в топливе определяется его теплотворной способностью, выражаемой количеством калорий на единицу массы, т. е. способностью нагреть при сгорании до определенной температуры некоторое определенное тело. Так, например, сжигая 1 *кг* нефти, освобождают энергию в 10 000 килокалорий, сжигая 1 *кг* каменного угля — 7 000 килокалорий и т. п.

Эквиваленты. Сравнивая механическую и тепловую работу, — нагревая воду при помощи трения и измеряя механическую работу, потребную для получения некоторого количества тепла, — нашли, что 1 джоуль превращается

в 0,239 калорий и, следовательно, 1 калория переходит в 4,128 *дж.*

Таким образом, 1 калория равна или эквивалентна 4,128 *дж.*

Соответственно 1 *дж*=0,239 *кал.*

Пример. Покажем на примере, как производится такой подсчет. Работая против сил трения (скажем, двигая товарные вагоны по рельсам) на пути в 100 *м*, совершим работу в 1 000 килоджоулей. Вся работа перешла в тепло (нагрелись буксы вагонов, нагрелись рельсы и ободья колес). Если бы вся эта тепловая энергия была собрана (она рассеялась в нашем примере) и употреблена на нагревание воды, то мы могли бы вскипятить некоторое количество воды. Подсчитаем, сколько воды можно было бы вскипятить:

$$1\,000 \text{ кдж} \times 0{,}239 \text{ кал/дж} = 239 \text{ килокалорий},$$

т. е. затраченная энергия в 1 000 *кдж*, выраженная в тепловых единицах, составит 239 *ккал.*

Чтобы вскипятить 1 *кг* воды, мы должны поднять ее температуру от 20° (комнатная температура) до 100°, т. е. нагреть ее на 100°—20°= =80°, т. е. потратить на это 80 *кал*×1 000=80 килокалорий Значит, собрав все тепло, рассеянное в процессе, мы могли бы вскипятить 239 : 80≈3 *кг* воды (знак ≈ означает: «приблизительно равно»).

В заключение отметим, что основная задача энергетической техники состоит в том, чтобы путем самых многообразных превращений энергию, полученную от какого-то природного источника — энергию падающей воды, энергию любого вида топлива, энергию солнечных лучей (первоисточник почти всех запасов энергии, которыми обладает человечество), наконец, стоящий сейчас на очереди источник энергии — энергию внутренних связей материи (так называемая «атомная» энергия) — перевести эту энергию в такую форму, которая окажется наиболее удобной и выгодной с точки зрения ее практического приложения в каждом отдельном случае.

Один пример такого процесса мы разобрали (работа подъемника). Читатель может сам придумать и разобрать еще ряд примеров.

1-4. МОЩНОСТЬ

Грузчик употребит целый день на то, чтобы поднять на четвертый этаж 2 тонны кирпича, а мощный подъемник легко сделает то же самое за 15 *мин.* Между тем грузчик и подъемник совершили одну и ту же работу.

Чайник воды, поставленный на керосинку, закипит через час. На газовой горелке он вскипит в 10 *мин.* Работа совершена одна и та же.

Ясно, что ни одно из введенных до сих пор понятий не характеризует разницы между такими процессами. Мы нуждаемся в новой характеристике процесса, которая установит, за сколько времени может быть совершена одинаковая работа.

Если одна и та же работа у одной системы занимает час, а у другой — четыре часа, то говорят, что первая обладает мощностью, в 4 раза большей, чем вторая.

В один час первая система сделает работу, в 4 раза бóльшую, чем вторая. Значит,

мощность определяется как отношение величины работы к промежутку времени, за который она произведена:

$$\textit{мощность} = \frac{\textit{работа}}{\textit{время}},$$

или

$$P = \frac{A}{t}.$$

Здесь P — принятое обозначение мощности; A — работа; t — как всегда — время.

Так как работа в системе МКС измеряется в джоулях, а время в секундах, то мощность в этой же системе измеряется в джоулях за секунду $\left(\frac{\textit{дж}}{\textit{сек}}\right)$. Эта единица называется также ваттом (*вт*):

$$1\ \textit{вт} = 1\ \frac{\textit{дж}}{\textit{сек}};$$

аналогично предыдущему мощность в 1 000 *вт* или 1 000 *дж/сек* назовем 1 *кдж/сек* или 1 *квт* (киловатт).

Мощность электрической плитки 0,5 *квт*. Примерно такую же мощность развивает человек, взбегая по лестнице на второй этаж за 6 *сек*.

Мощность автомобиля «Москвич», около 17 *квт*. Мощность Волжской ГЭС имени В. И. Ленина равна 2 300 тыс. *квт*.

Распространена другая единица измерения мощности — «лошадиная сила».

Здесь мы еще раз сталкиваемся с физической неточностью, допускаемой по традиции. Термин «лошадиная сила» был введен английским конструктором Уаттом из рекламных соображений Он хотел показать, во сколько раз его паровые машины выгоднее лошадей (бывших

в то время одним из основных двигателей), и потому выбрал в качестве единицы измерения мощность, несколько превышающую среднюю мощность сильной лошади.

Уатта не очень беспокоила недостаточная точность термина.

Всегда следует помнить, что единица «лошадиная сила» употребляется для определения мощности и с силой ничего общего не имеет.

Одна «лошадиная сила» равна 736 *вт*, или 0,736 *квт*.

Ясно, что чем дольше работает машина, тем больше работа, совершенная ею.

Из определения мощности следует, что

$$\textit{работа} = \textit{мощность} \times \textit{время}.$$

Из определения единиц мощности и работы следует также, что джоуль и ватт-секунда — это одно и то же, так же как ватт и джоуль в секунду.

Выражение работы в ватт-секундах или чаще в киловатт-часах часто применяют в электротехнике.

1-5. ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ НА РАССТОЯНИЕ

В большинстве случаев мы стремимся использовать энергию не в том месте, где она непосредственно наличествует в виде каких-то источников. Дом отапливается не там, где бьет нефтяной фонтан, и завод — потребитель энергии строится не обязательно там, где большая река позволяет получать значительные мощности, используя энергию падающей воды.

Механическая передача энергии при помощи трансмиссий, валов и приводных ремней немыслима при расстояниях, превышающих несколько десятков метров.

Первым решением этой задачи было применение топливных двигателей и соответственно перевозка топлива. Однако такая перевозка требует настолько больших дополнительных затрат энергии, что этот способ был в значительной мере вытеснен другим, явившимся ему на смену. Это — передача электроэнергии по проводам.

Гениальный русский ученый М. В. Ломоносов (стр. 188), изучая электричество, говорил о возможности передачи электрической «силы» на расстояние. Сто двадцать лет назад передача электрической энергии по проводам — передача энергии для целей связи была осуществлена в России создателем первого в мире электромагнитного телеграфа П. Л. Шиллингом (1786—1837 гг.).

Первая линия передачи электрической энергии, предназначенная для приведения в действие двигателей, также была построена в России инж. Ф. А. Пироцким. Но об этом мы будем говорить дальше (гл. 2, стр. 85), а сейчас разберем еще один способ передачи энергии.

В котле нагревается вода любым топливом, сжигаемым в топке. Горячая вода поступает в трубы, по которым следует до места потребления (рис. 1-2). Там она поступает

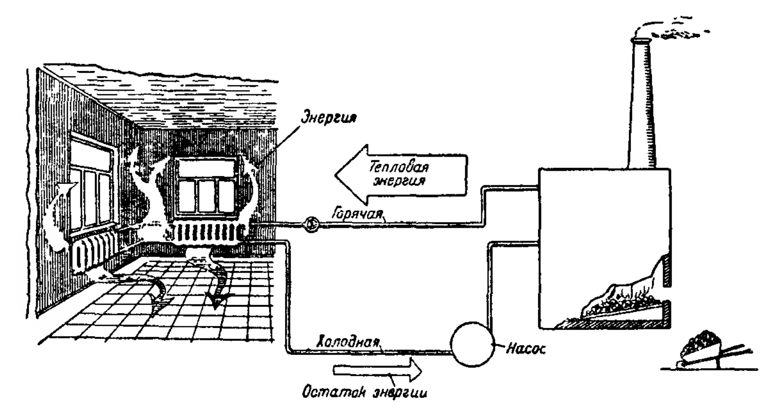


Рис. 1-2. Система центрального отопления.

Горячая вода — переносчик энергии. Вода движется к радиатору с большим запасом тепловой энергии и возвращается от него, лишившись избытка энергии. В котле та же вода получает новый запас энергии, который она рассеет в радиаторе. Так происходит передача энергии. Энергия топлива, сжигаемого в котельной, поступает в комнаты.

в радиаторы центрального отопления и нагревает комнаты, сама при этом охлаждаясь. После этого холодная вода по другим трубам насосами подается обратно в котел, где она снова нагревается. Затем весь процесс повторяется.

Рассмотрим отдельные звенья системы передачи и разберемся в их назначении.

В топке происходит выделение энергии топлива, которая в котле передается воде. Нагретая вода становится носителем энергии. Вместе с потоком воды по трубам поступает к потребителю как бы поток тепловой энергии, которая в радиаторах рассеивается, нагревая окружающий воздух. Поток охлажденной воды, поступающий в котельную, несет несравненно меньшее количество тепловой энергии. Таким образом, в результате цикла перенесено какое-то количество энергии от ее производителя к ее потребителю, а переносчик энергии — вода — вернулся в преж-

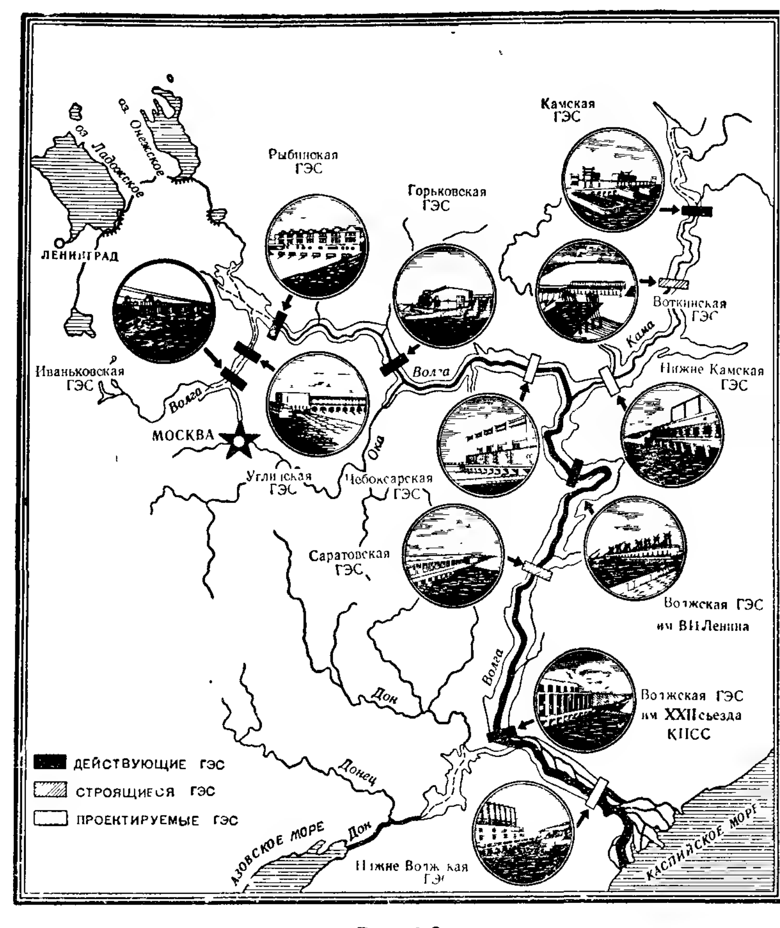


Рис 1-3.

нем объеме. Так возвращаются на нефтеразработки пустые цистерны, отдав бензин потребителю энергии.

Передача энергии нагретой водой или паром для целей отопления и нагрева часто экономичнее, чем перевозка непосредственно топлива. По такой системе работают отопительные устройства целых поселков и городов (теплоцентрали). Не исключена возможноть перевода тепловой энергии и в механическую. Для этого по трубам передается нагретый пар высокого давления; пар попадает в турбины и, расширяясь, вращает их. Однако при увеличении

радиуса действия и количества передаваемой энергии паропроводы быстро теряют свою экономичность.

Мы можем смело сказать, что задача передачи больших и очень больших энергий на огромные расстояния (до 1 000 *км*) полностью и блестяще разрешается, если мы выберем в качестве носителя энергии не воду и не пар, а электричество. Электрический ток переносит вдоль тонких металлических проводов то же количество энергии, для которого потребовался бы мощный и дорогой паропровод. Кроме того, электрическая энергия необыкновенно просто по сравнению с другими поддается всевозможным превращениям.

Преимущества такого способа передачи энергии трудно даже перечислить. Частью они известны из повседневной жизни, частью выявятся в процессе чтения настоящего руководства. В дальнейшем мы не будем сравнивать этот способ передачи с другими, но читатель сам увидит, насколько велики возможности энергетических преобразований у этого вида энергии и насколько высок по сравнению с другими у него коэффициент полезного действия всех этих преобразований

К. Маркс и Ф. Энгельс предвидели огромное будущее электроэнергетики. По поводу первых опытов электрической передачи энергии Энгельс говорил о том, что новое открытие «... делает возможным использование также и самой отдаленной водяной энергии, и если вначале оно будет полезно только для *городов*, то в конце концов оно станет самым мощным рычагом для устранения противоположности между городом и деревней».

Наши пятилетки превратили эти возможности в действительность. В мае 1956 г. Москва получила энергию от Волжской гидроэлектростанции имени В. И. Ленина. Эта энергия проходит путь в 1 000 *км*, и для этого потребовалось огромное напряжение в 400 тыс. *в* (рис. 1-3).

ГЛАВА ВТОРАЯ

ТОК И НАПРЯЖЕНИЕ

2-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для того чтобы зажечь электрическую лампу, ее нужно присоединить к сети — к проводам, идущим от установленных на электростанциях специальных машин, называемых **генераторами** и вырабатывающих электрическую

энергию. По этим проводам к лампе подводится энергия, необходимая для накала ее нити.

Крупные станции питают сотни тысяч ламп и двигателей. Необходимую для этого энергию они получают от сжигания угля, нефти, торфа или от падающих масс воды (гидростанции).

С 1954 г. в СССР работает первая в мире электростанция, получающая энергию из недр атомов.

От генераторов, установленных на электростанциях, электрическая энергия через линии передачи и преобразующие подстанции подводится ко всем потребителям — к электрическим двигателям, вращающим станки, поднимающим грузы, к сварочным аппаратам, к электропечам и многим другим.

Но электрические лампы и двигатели могут получать питание не только от сети электрических станций. В карманном фонаре нить лампы накаливается, если она соединена с гальваническими элементами (батарей), помещенными внутри карманного фонаря.

Электрический двигатель, применяемый для запуска автомобильного мотора, питается от аккумулятора.

В поездах для электрического освещения также пользуются аккумуляторами, а во время хода поезда лампы питаются энергией от специального генератора, т. е. машины, вырабатывающей электрическую энергию. Эта машина приводится в движение колесами вагона.

Все перечисленные здесь источники питания — электрические машины на электростанциях, аккумуляторы — не являются, конечно, источниками энергии, они только преобразуют подведенную к ним энергию (механическую или химическую) в энергию электромагнитную, передаваемую дальше по проводам. В батареях аккумуляторов или элементов энергия бывает запасена в форме химических соединений. И, как всем известно, батарейки карманных фонарей нужно сменять после определенного числа часов горения лампы, когда запасенная в батарейке энергия израсходовалась. Аккумуляторы нужно периодически ставить на зарядку, чтобы подвести к ним новую порцию энергии. Электроэнергия, полученная потребителем, вновь превращается либо в тепло и свет (лампы и нагревательные приборы), либо, в энергию механическую (двигатели), либо, наконец, в химическую энергию (зарядка аккумулятора, электрохимические установки).

Основное значение электротехники заключается в том,

что она дает чрезвычайно удобный способ преобразования, передачи и распределения энергии.

Научиться понимать законы, по которым происходят эти превращения энергии, овладеть ими, суметь направить процесс по тому пути, который нам нужен, — это и значит изучить электротехнику. Это изучение мы начнем с рассмотрения простейшей электротехнической установки.

2-2. ПРОСТЕЙШАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА

Генератор. В установке, схематически изображенной на рис. 2-1, основным является источник электрического тока — генератор. Он преобразует подведенную к нему механическую энергию в электромагнитную. Генератор можно сравнить с паровым котлом: в последнем химическая энергия топлива преобразуется в тепловую энергию нагретой воды (пара), а в генераторе механическая энер-

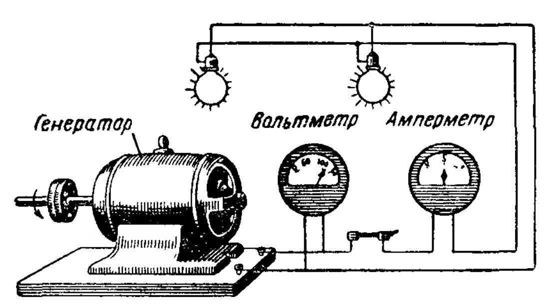


Рис. 2-1. Простейшая электрическая установка. Генератор снабжает энергией лампы накаливания.

гия, сообщаемая ему валом двигателя, преобразуется в электрическую энергию, направляемую по проводам.

Работу генератора труднее объяснить, чем работу котла. Мы ее рассмотрим потом, а пока ограничимся указанием на то, что генератор может служить источником электрического тока, и механический двигатель затрачивает на его вращение тем бóльшую мощность, чем большую мощность отдает генератор.

Простейший генератор имеет два зажима; к ним присоединяются две металлические (например, медные или алюминиевые) проволоки, соединяющие генератор с потребителем.

На рисунке потребитель представлен в виде всем известных электрических ламп накаливания.

Внимательно присмотревшись к рисунку, мы видим, что цепь электрического тока является замкнутой. Здесь имеется даже несколько замкнутых цепей из металлических проводников. Идя вдоль правого провода, попадаем к одному из зажимов лампы накаливания, проходим через ее металлическую нить, затем возвращаемся по обратному проводу через амперметр и рубильник к левому генераторному зажиму.

Замкнутость электрической цепи есть необходимое условие для протекания электрического тока.

Если разомкнуть рубильник, показанный на рис. 2-1, цепь тока окажется прерванной, ток в цепи протекать не будет, и лампы погаснут.

То же самое получится, если лампа (рис. 2-2) «перегорит», т. е. расплавится ее металлическая нить. И в этом случае электрическая цепь окажется незамкнутой.

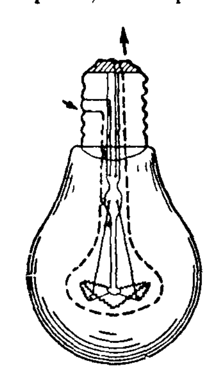


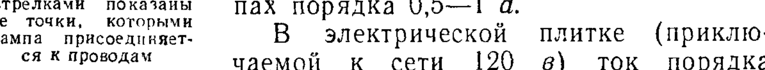
Рис. 2-2. Электрическая лампа накаливания.

Стрелками показаны те точки, которыми лампа присоединяется к проводам

Ток. Для контроля за работой установки в нее включены два измерительных прибора. Один из них измеряет ток или, как говорят иногда, силу тока.

Этот прибор получил название амперметра, потому что в качестве единицы электрического тока принят ампер. Эта буква сокращенно обозначается буквой *а*. Амперметр включается в рассечку проводов: цепь тока разрезается и в месте разреза концы проводов присоединяются к двум металлическим зажимам амперметра.

Электрический ток в комнатных лампах порядка 0,5—1 *а*.



В электрической плитке (приключаемой к сети 120 *в*) ток порядка 4—5 *а*.

В линиях передачи высокого напряжения ток достигает сотен и тысяч ампер.

При коротких замыканиях в кабельной сети токи нередко достигают десятка тысяч ампер

В линиях связи применяют небольшие токи, например

токи, текущие в телефонном аппарате, составляют сотые доли ампера.

Токи молний достигают сотен тысяч ампер.

Напряжение. Другой прибор, включенный между проводами, измеряет существующее между ними электрическое напряжение.

Единицей электрического напряжения является вольт. Эта единица сокращенно обозначается буквой *в*. Поэтому прибор, измеряющий напряжение, носит название вольтметра.

Напряжение осветительной сети внутри зданий обычно равно 127 или 220 *в*. Напряжение трамвайной сети 600 *в*. В линиях передачи высокого напряжения оно достигает сотен тысяч вольт. Напряжения, возникающие в человеческом теле, — по ним врачи судят о работе сердца, мозга и других частей нашего организма, — очень малы. Так, электрокардиограф, прибор, записывающий работу сердца, отмечает напряжения, составляющие одну стотысячную долю вольта.

Автомобильные аккумуляторы имеют напряжения 6 или 12 *в*. Батарея карманного фонаря — около 4 *в*.

Напряжение и ток являются основными показателями того, что происходит в электрической цепи.

Во всякой электрической установке можно выделить следующие основные части: 1) провода; 2) разъединяющие аппараты; 3) потребители; 4) измерительные приборы; 5) генераторы.

С устройством измерительных приборов и генератора мы ознакомимся дальше, а здесь рассмотрим остальные части электрической установки.

Провода. Металлические провода, связывающие генератор с потребителем, имеют назначение, подобное назначению трубопровода: по ним течет, движется электричество.

Движущееся электричество называют электрическим током. Поэтому говорят, что по проводам течет или проходит ток.

Электрический ток проходит в толще металла, так же как пар проходит внутри труб. Провода для большей гибкости иногда делаются скрученными из нескольких отдельных проволок.

Скрученная вместе пара проводов, каждый из которых состоит из тонких проволок, образует шнур. Шнуры применяют для осветительной проводки.

Изоляция. Роль стенок трубопровода в данном случае играет воздух, окружающий проволоку, или слой изолирующего материала, покрывающий проволоку (рис. 2-3).

Таким изолирующим материалом могут служить: бумага, пропитанная смесью минерального масла с канифолью (вид смолы), резина, шелк, проклеенная лаком слюда, фарфор, пластмасса и т. п. Дело в том, что

электрический ток, свободно проходя через металл, не может проходить через воздух, через резину, бумагу и другие электроизолирующие материалы.

Когда берут провод в виде голой проволоки, то изоляцией служит воздух. Но проволока ведь должна быть както прикреплена к стенам или специальным опорам, а материал стен и опор не является достаточно изолирующим — по нему хоть и плохо, но может проходить ток. Поэтому

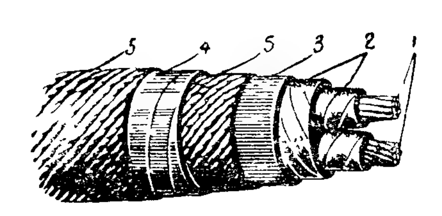


Рис. 2-3 Электрический кабель.

1 — токоведущие проволочные жилы, *2* — изоляция из пропитанной бумаги, *3* — свинцовая оболочка, препятствующая влаге проникнуть в глубь изоляции, *4* — стальная лента, защищающая кабель от механических повреждений, *5* — джутовая оплетка

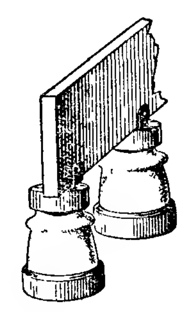


Рис. 2-4. Провод прямоугольного сечения (шина) на опорных изоляторах.

голые провода прикрепляются к опорам или стенам на изоляторах (рис. 2-4).

Такие изоляторы, подвесные или опорные, обычно делаются из фарфора.

Чем выше давление пара, тем из более прочного материала должна быть сделана труба. Прочность труб, применяемых для водопровода, может оказаться недостаточной для пара высокого давления. Пар с давлением в несколько десятков атмосфер может разорвать, разрушить такую трубу.

Так же и электрическая изоляция должна быть достаточно высокого качества и достаточной толщины. Если она

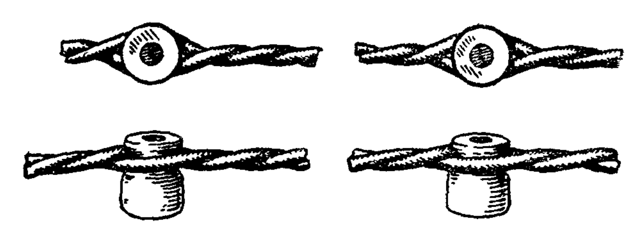


Рис. 2-5. Фарфоровые изоляторы (ролики) низкого напряжения (120, 220 *в*).

лишком тонка или недостаточно высокого качества, может произойти ее разрушение или, как говорят, пробой изоляции.

Шнур, применяемый для осветительной проводки в закрытых помещениях, легко выдерживает напряжение 100, 200 и даже 500 *в*, но не пробуйте присоединить его к источнику тока с напряжением в несколько тысяч вольт. Изоляция будет пробита и ток будет замыкаться через искру, образующуюся в месте пробоя; воздух, раскаленный током, проводит электричество почти так же хорошо, как и металлический провод.

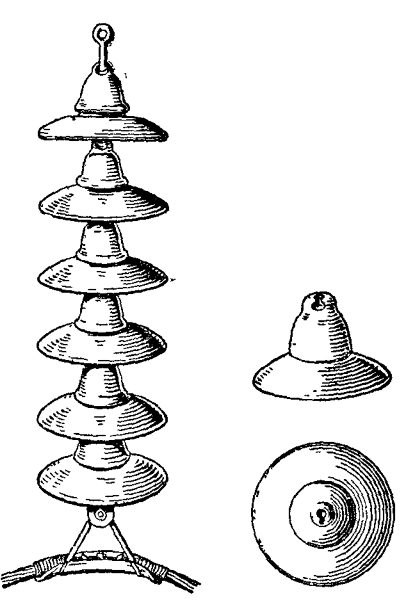


Рис. 2-6. Цепочка изоляторов, поддерживающих провод высокого напряжения (110 *кв*). Справа показаны два отдельных изолятора. Их диаметр приблизительно равен 30 *см*.

Точно так же в случае воздушных проводов при высоких напряжениях необходимо оставлять достаточное расстояние между проводами, а также между проводами и стеной или опорой. Кроме того, и фарфоровые изоляторы нужно выбирать подходящими для данного напряжения.

На рис. 2-5 и 2-6 показаны фарфоровые изоляторы для низкого и высокого напряжений.

Выбор сечения проводов. Чем больше воды или пара протекает по трубам, тем

2- Зак 621

ТАБЛИЦА 2-1

Длительно допустимые нагрузки медных проводов и шнуров с резиновой изоляцией, проложенных на роликах

Сечение меди	0,5	0,75	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	*мм²*
Длительно допускаемый ток	6	6	6	10	15	25	46	68	90	125	150	*а*

Примечание. Нагрузки проводов с алюминиевыми жилами следует принимать равными 77% нагрузки соответствующих медных проводов.

шире должны быть трубы, тем больше должно быть их сечение.

Точно так же, чем больший ток идет по проводам, тем больше должна быть площадь их поперечного сечения. В табл. 2-1 приведены наибольшие значения длительно протекающих токов для медных и алюминиевых проводов разных сечений. Более подробные сведения о допустимых нагрузках приведены в конце главы.

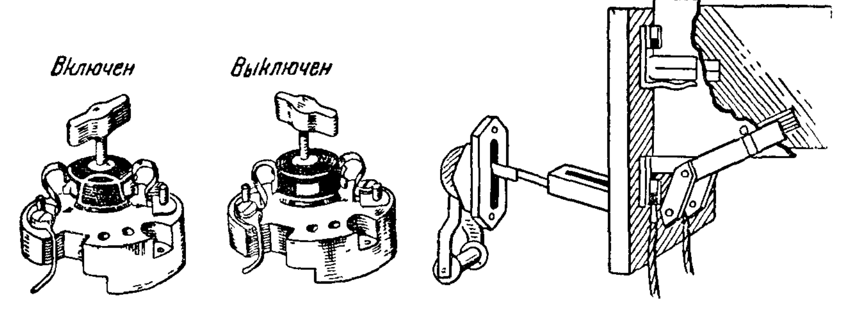


Рис. 2-7. Ламповый выключатель. Рис. 2-8. Рубильник.

Разъединяющие аппараты. Для того чтобы преградить путь пару, нужно отделить одну часть трубы от другой посредством сплошной металлической перегородки. Для того чтобы преградить путь току, нужно рассечь провод и оба конца отделить друг от друга слоем сплошной изоляции. Такой изоляцией могут служить, например, воздух или масло.

На рис. 2-7—2-11 изображены пять разных аппаратов, служащих для преграждения пути току или, другими словами, для разрыва цепи.

Все эти аппараты включаются в рассечку проводов.

Первый из них — **выключатель** (рис. 2-7), применяемый для включения и выключения ламп накаливания. В одном положении он соединяет подходящие к нему провода металлической пластинкой, в другом положении он создает между ними разрыв электрической цепи, вводя между концами проводов изолирующее вещество (фарфор, фибра). Такого рода выключатели приспособлены для выключения небольших токов (несколько ампер), проходящих в осветительной сети.

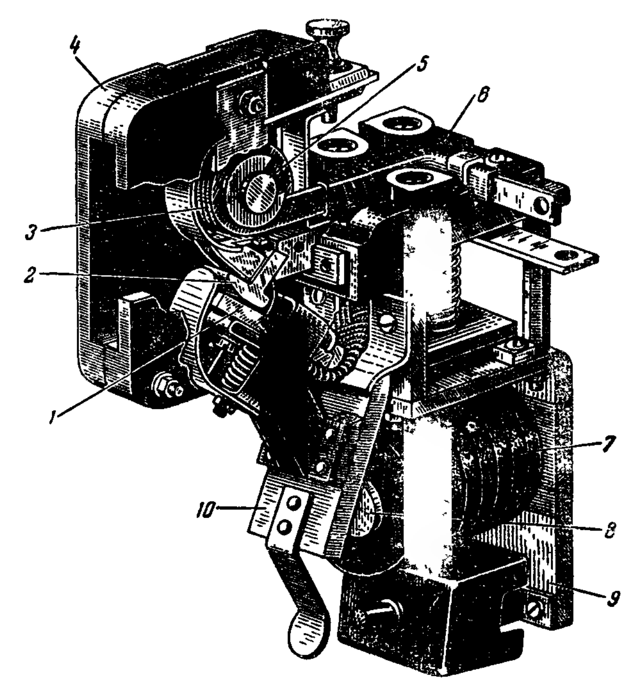


Рис. 2-9. Контактор типа КП-523.

1 — подвижиой контакт; *2* — иеподвижный контакт; *3* — втягивающая катушка, *4* — гасительная камера, *5* — сердечник катушки *4*, *6* — токоподвод к катушке *4*, *7* — электромагнит; *8* — сердечиик электромагнита; *9* — металлический корпус контактора; *10* якорь.

На рис. 2-8 изображен выключатель, называемый обычно **рубильником**. На изолирующей пластине крепятся четыре конца, принадлежащие двум проводам электрической цепи. Эти концы соединены со специальными пружинящими гнездами, в которые укладываются два металли-

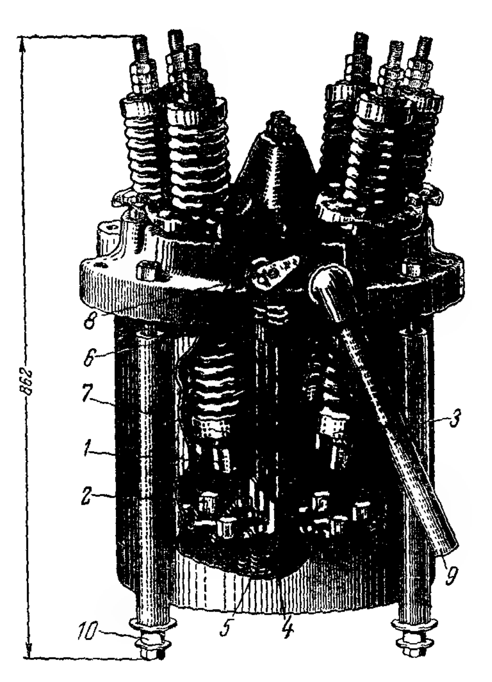


Рис. 2-10. Масляный выключатель типа ВМБ на 10 *кв.*

1 — неподвижный контакт; *2* — подвижной контакт; *3* — штанга; *4* — контактная траверса; *5* — пружина, нажимающая на контакты; *6* — отключающая пружина; *7*—фарфоровая рубашка в масле; *8* — указатель положения включено — отключено; *9* — выхлопная труба для отвода газов; *10* — опорный изолятор.

ческих ножа. С нижними гнездами ножи соединены при помощи металлических осей, вокруг которых они могут поворачиваться.

Когда ножи рубильника опущены, путь току прегражден, так как ток не может проходить по воздуху.

Такой рубильник может разрывать цепь с током в десятки ампер и может пропускать ток в сотни ампер (разумеется, при соответствующей конструкции). Разрывать рубильником большие токи не рекомендуется.

Рубильники применяются только в установках с напряжением до 500—600 *в*.

Рубильники, как правило, должны быть закрыты защитным кожухом или установлены за щитом, как это и показано на рис. 2-8.

В современных установках вместо рубильников часто ставятся более совершенные выключатели (рис. 2-9).

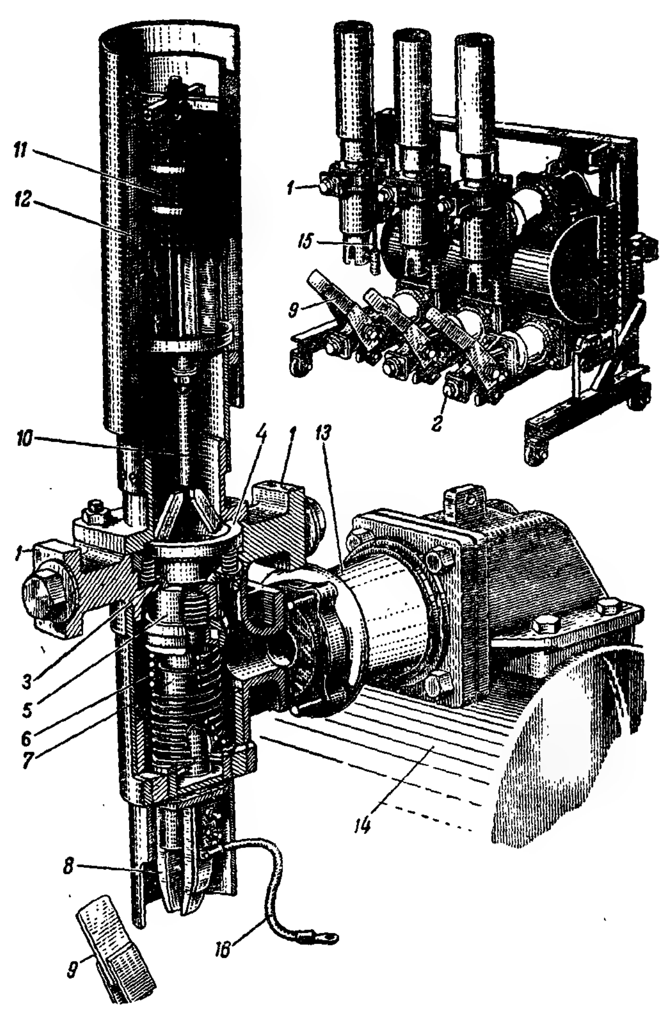


Рис. 2-11. Выключатель со сжатым воздухом на 6,3 *кв* и 1 000 *а*.

1 — подвод тока; *2* — отвод тока; *3* — неподвижный контакт; *4* — кольцо неподвижного контакта; *5* — держатель пружины; *6* — пружина подвижного контакта; *7* — подвижной контакт; *8* — неподвижный контакт разъединителя; *9* — нож разъединителя; *10* — промежуточный электрод; *11* — глушитель; *12* — шунтирующее сопротивление; *13* — изолятор полый; *14* — бак со сжатым воздухом; *15* — перемычка шунтирующего сопротивления, соединяющаяся с гибкой связью *16*.

В установках высокого напряжения (тысячи, десятки или даже сотни тысяч вольт) выключение тока производится посредством **масляных выключателей** — «масляников» (рис. 2-10). В них разрыв цепи тока производится в жидком минеральном масле, являющемся прекрасным изолятором. Такие выключатели могут разрывать цепь, когда в ней течет ток в тысячи ампер.

Масляные выключатели имели одно время повсеместное распространение как единственные прерыватели тока высокого напряжения. Однако они обладают большими недостатками: например, масло способно воспламеняться

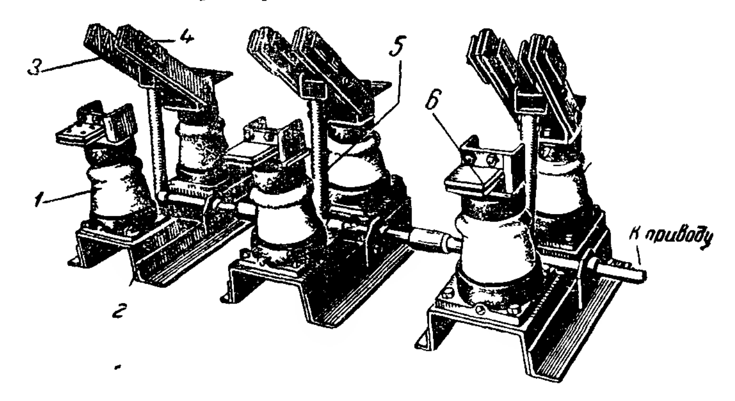


Рис. 2-12. Разъединитель.

под длительным действием электрической искры (или электрической дуги). Поэтому за последние 10—15 лет стали широко применяться особые конструкции мощных выключателей с воздушным дутьем (рис 2-11).

Кроме выключателей, в сетях высокого напряжения бывают установлены **разъединители** (рис. 2-12). Они служат для производства переключений и разъединений проводов только тогда, когда в цепи нет тока.

При попытке отключить разъединителем провода, когда по ним проходит ток, между его концами может образоваться большая искра, переходящая в дугу, соединяющую концы разорванной цепи проводов. Горение такой дуги может причинить серьезные повреждения.

Потребитель. Рассмотрим теперь ту часть схемы, которую мы называем *потребителем* или *нагрузкой.* В нашей схеме (рис. 2-1) в качестве потребителя показаны лампы накаливания.

Когда цепь тока замыкается через тонкую нить лампы, эта нить накаливается и начинает светиться. Для того чтобы предотвратить сгорание нити, ее заключают в стеклянную колбу, внутри которой нет кислорода, необходимого для всякого горения.



Павел Николаевич Яблочков (1847—1894 гг.).

В современных лампах не ограничиваются удалением кислорода и других вредных газов, а заполняют колбы азотом или аргоном, т. е. газами, неспособными поддерживать горение. Если лампочка в конце концов перегорает, то это происходит от распыления металлического волоска под влиянием электрических сил или же вследствие его поломки.

Электрическое освещение было изобретено и впервые применено в России.

Еще в 1802 г. акад В. В. Петров сделал такое открытие· замыкая цепь мощных (по тем временам) гальванических элементов, он наблюдал возникновение пламени (электрическая дуга) между соприкасающимися, а потом слегка раздвигаемыми углями.

Он так описывал свое наблюдение· «..является между ними (между углями) весьма яркий белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медленнее загораются и от которого темный покой (комната) довольно ясно освещен быть может».

В 1876 г. русский изобретатель П. Н. Яблочков применил дугу Петрова для электрического освещения. Электрические свечи Яблочкова получили широкое применение, и за границей электрическое освещение назвали «русским светом» (рис. 2-13).

Лампа накаливания также была изобретена русским инженером А. Н. Лодыгиным (в 1874 г.); первоначально в ней применялась угольная нить, накаливаемая током.

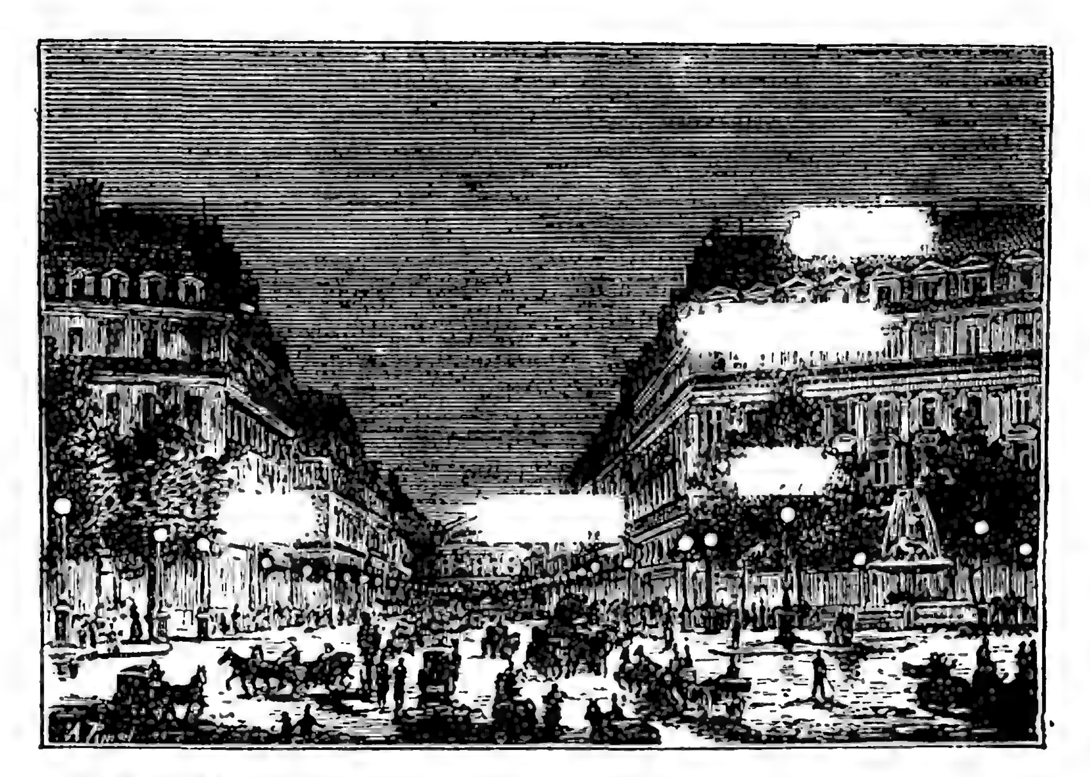


Рис 2-13 Одна из центральных улиц в Париже, освещенная свечами Яблочкова в конце прошлого века

2-3. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Приключим к генератору две лампы так, как это показано на рис 2-14 Обе лампы при этом окажутся под одним напряжением, равным напряжению питающего их источника (генератора или сети) Ток в лампах при этом, конечно будет разным, если различны сами лампы

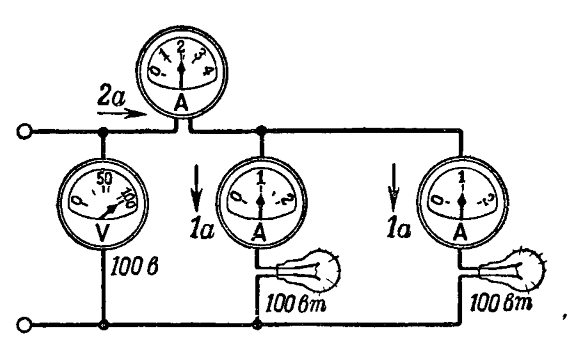


Рис 2 14 Две одинаковые лампы мощностью по 100 *вт* каждая присоединены к сети напряжением 100 *в*

Ток протекающий из сети к лампам равен 2 *а* Он разветвляется в узлах между которыми включены лампы со своими измерительными приборами (амперметрами) По каждой ветви проходит ток 1 *а*

Цепь, показанная на рис 2 14, это разветвленная цепь

Точки цепи, к которым сходится несколько проводов, называют узлами Участки цепи, соединяющие между собой узлы, называют ветвями В пределах каждой ветви ток имеет одинаковое значение Показание амперметра поэтому не зависит от места его включения в данной ветви

Ветви, которые всегда находятся под одинаковыми напряжениями, называются параллельными.

На рис 2 14 лампы включены параллельно

На рис 2-15 показана еще более сложная цепь — она содержит четыре лампы, предназначенные для параллельного включения

Все лампы изготовлены для напряжения 100 *в* Это значит, что при включении к сети 100 ватная лампа будет потреблять мощность 100 *вт*, а 300 ватная лампа — 300 *вт*.

Если все лампы выключены, тока в цепи не будет, но напряжение в цепи может существовать. Это можно сравнить с паровой установкой при закрытом трубопроводе: давление внутри котла и в трубопроводе до закрытого вентиля может быть очень большим, но движения пара нет — вентиль закрыт.

Пусть напряжение цепи (измеряемое вольтметром) равно 100 *в*. Это же напряжение будет иметь каждая из включенных ламп.

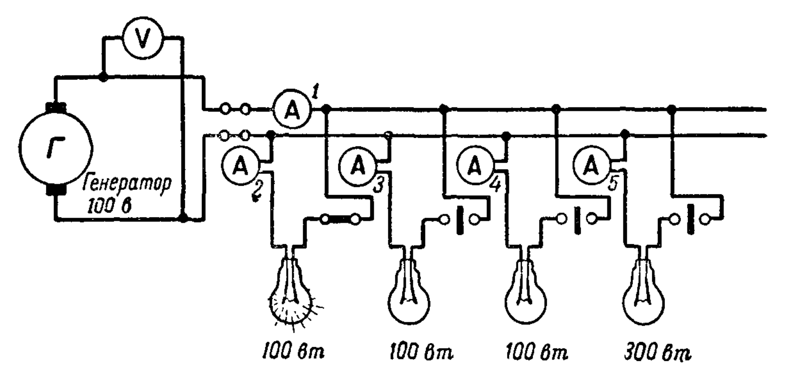


Рис. 2-15. Осветительная установка.

Поворотом выключателей лампы соединяются параллельно одна другой. На схеме показаны генератор *Г*, измерительные приборы (вольтметр *V* и пять амперметров *А*), лампы накаливания и выключатели

Начнем теперь включать лампы и будем следить за показанием электроизмерительных приборов.

Включим одну 100-ваттную лампу, повернув соответственным образом выключатель (как это показано на схеме). Лампа начнет светиться. Стрелка амперметра 2, включенного вслед за этой лампой [1], сойдет с нулевого положения и будет показывать 1 *а*. То же самое будет показывать и амперметр *1*, включенный около генератора до ответвления цепи к первой лампе.

Повернем выключатель второй 100-ваттной лампы. Стрелка амперметра *3*, включенного последовательно с этой лампой, отклонится, и прибор покажет, что через лампу проходит ток 1 *а*. Амперметр *1*, включенный около генератора, покажет теперь 2 *а*: через генератор проходят ток пер-

[1] На практике не включают амперметр перед каждой лампой: в этом нет необходимости. Но осуществить соединение по схеме рис. 2-15, конечно, очень легко.

вой лампы (1 *а*) и ток второй лампы (1 *а*). Ток, протекающий через генератор, равен их сумме:

$$1a+1a=2a.$$

Попробуйте самостоятельно ответить на вопрос: что будут показывать амперметры *1*, *4* и *5* после включения третьей и четвертой ламп?

2-4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Проделаем еще один опыт. Возьмем несколько одинаковых ламп и включим их одну вслед за другой (рис. 2-16). Такое соединение называют последовательным.

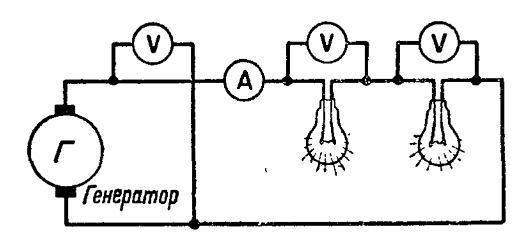


Рис. 2-16. Генератор питает две последовательно включенные лампы.

На схеме показаны амперметр и три вольтметра; один измеряет общее напряжение, два других измеряют напряжение на каждой из ламп.

Его следует отличать от ранее рассмотренного параллельного соединения.

При последовательном соединении нескольких участков цепи (скажем, нескольких ламп) ток в каждом из них одинаков.

Те участки цепи, по которым всегда проходят одинаковые токи, называются последовательными.

Итак, возьмем две стоваттные лампы, такие же, какие были рассмотрены в предыдущем опыте, и включим их последовательно к генератору с напряжением 100 *в*.

Лампы будут еле светиться, их накал будет неполным. Почему? — Потому, что напряжение источника (100 *в*) разделится поровну между обеими последовательно включенными лампами. На каждой из ламп теперь окажется напряжение уже не 100, а только 50 *в*.

Напряжение на лампах одинаково потому, что мы взяли две одинаковые лампы. Если бы лампы были неодинаковы, общее напряжение 100 *в* разделилось бы между ними, но уже не поровну: например, на одной лампе могло бы оказаться 70 *в*, а на другой 30 *в*.

Как мы увидим впоследствии, более мощная лампа получает при этом меньшее напряжение. Но ток в двух последовательно включенных даже разных лампах остается одинаковым. Если одна из ламп перегорит (порвется ее волосок), погаснут обе лампы.

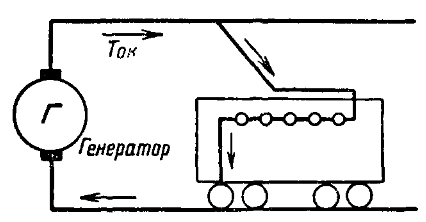


Рис. 2-17. Последовательное включение ламп в трамвайном вагоне.

На рис. 2-16 показано, как нужно включить вольтметры, чтобы измерить напряжение на каждой из ламп в отдельности.

Опыт показывает, что напряжение на внешних зажимах последовательных участков цепи всегда равно сумме напряжений на отдельных участках.

Лампы горели нормально, когда через них проходил ток 1 *а*, но для того чтобы такой ток проходил через лампы, нужно было приложить к каждой из них напряжение 100 *в*. Теперь напряжение на каждой из ламп меньше 100 *в*, и ток, идущий через них, будет меньше 1 *а*. Он будет недостаточным, чтобы раскалить нить лампы.

Будем теперь регулировать работу генератора: будем повышать его напряжение. Что при этом произойдет? Вместе с увеличением напряжения увеличивается ток.

Лампы начнут ярче светиться. Когда, наконец, мы поднимем напряжение генератора до 200 *в*, на каждой из ламп установится напряжение 100 *в* (половина общего напряжения), и через лампы будет проходить ток 1 *а*. А это и есть условие их нормальной работы. Обе лампы будут гореть с полным накалом и потреблять нормальную для них мощность 100 *вт*. Общая мощность, отдаваемая при этом генератором, будет равна 200 *вт* (две лампы по 100 *вт* каждая).

Можно было бы включить последовательно не две лампы, а десять или пять. В последнем случае опыт показал бы нам, что лампы будут гореть нормально, когда общее напряжение будет увеличено до 500 *в*. При этом напряже-

ние на зажимах каждой лампы (все лампы мы предполагаем одинаковыми) будет 100 *в*. Ток в лампах будет и теперь равен 1 *а*.

Итак, мы имеем пять ламп, включенных последовательно; все лампы горят нормально, каждая из них при этом потребляет мощность 100 *вт*, значит общая мощность будет равна 500 *вт*.

Последовательное соединение ламп применяется при освещении трамвайных вагонов: последовательно включают пять одинаковых ламп, рассчитанных каждая на 120 *в*. При этом общее напряжение должно составлять:

$$120\,в \times 5 = 600\,в.$$

Шестьсот вольт — это как раз напряжение между трамвайным проводом и рельсом, проложенным в земле. Рельс служит обратным проводом (рис. 2-17). Путь тока в этом случае, как видно из чертежа, такой: генератор, воздушный провод, дуга трамвая, провода и нити ламп, колеса, рельсы и опять генератор.

Если при этом через цепь ламп будет протекать ток 0,5 *а*, мощность, потребляемая ими, будет равна 300 *вт* (по 60 *вт* на лампочку).

2-5. ВКЛЮЧЕНИЕ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

В рассмотренных примерах электрических цепей все приборы для измерения тока (амперметры) были соединены последовательно с тем участком цепи, ток в котором нужно было измерить, т. е. последовательно с генератором или лампами. Напротив, все приборы для измерения напряжения (вольтметры) были включены параллельно тем участкам цепи, напряжение которых нужно было измерить, т. е. параллельно генератору или лампам. Это является общим правилом.

Амперметр всегда включается последовательно с теми приборами или машинами, ток которых он измеряет. Наоборот, вольтметр всегда включается параллельно тем приборам или машинам, напряжение на которых он измеряет.

2-6. МОЩНОСТЬ

Мы видели (§ 2-3), что в случае параллельного включения ламп

при неизменности общего напряжения потребляемая мощность возрастает прямо пропорционально току.

Иными словами, двукратное увеличение мощности связано с двукратным увеличением тока, трехкратное увеличение мощности — с трехкратным увеличением тока.

Когда у нас был включен потребитель мощностью 100 *вт* при напряжении 100 *в*, ток был 1 *а*, при 200 *вт* — ток 2 *а*, при 300 *вт* — ток 3 *а*, при 600 *вт* — ток 6 *а*. А если бы мы включили 50-ваттную лампу на напряжение 100 *в*, ток бы бы всего полампера (0,5 *а*).

Из опытов, рассмотренных в § 2-4, можно было заметить, что при одном и том же токе (в наших примерах 1 *а*) мощность возрастает вместе с ростом напряжения Или, говоря другими словами,

при неизменности тока потребляемая мощность прямо пропорциональна напряжению.

Итак, мощность зависит от тока и напряжения. В одном случае (неизменяющееся напряжение) мощность прямо пропорциональна току. В другом случае (неизменяющийся ток) мощность прямо пропорциональна напряжению.

Сопоставляя оба эти вывода, можно заключить, что

мощность определяется произведением тока и напряжения.

Если мощность выражать в ваттах, ток и напряжение — в амперах и вольтах, то мы можем записать формулу мощности электрического тока так:

мощность = ток × напряжение.

Пользуясь буквенными обозначениями для мощности P, для тока I, для напряжения U, эту формулу можно записать так:

$$P = I \cdot U.$$

2-7. СОПРОТИВЛЕНИЕ

Мы уже упоминали, что при последовательном включении ламп все лампы должны быть одинаковыми. Что же будет, если мы включим последовательно разные лампы?

Возьмем для примера одну лампу в 50 *вт* и одну лампу в 100 *вт*, рассчитанные на 120 *в*, и включим их последовательно к генератору с напряжением 240 *в*.

Получим ли мы теперь на каждой из ламп половинное напряжение, т. е. 120 *в*? Нет. На 100-ваттной лампе напряжение будет всего лишь 80 *в*, а на 50-ваттной напряжение будет равно 160 *в*. Складывая эти напряжения 80 *в* + 160 *в*, мы получим в сумме 240 *в*, т. е. как раз напряжение источника [1].

Но как объяснить, что напряжение на одной лампе получается больше, чем на другой?

На этот вопрос отвечают так: лампы оказывают различное с о п р о т и в л е н и е прохождению тока, а ток в обеих лампах одинаковый (лампы включены последовательно); чтобы заставить один и тот же ток пройти через лампы с разными сопротивлениями, нужно затратить разные напряжения.

В нашей первой схеме (параллельное включение) мы видели, что при одном и том же напряжении через лампу меньшей мощности проходил и меньший ток. Даже можно сказать точнее: через лампу, мощность которой в 2 раза меньше, проходил ток, также в 2 раза меньший. Значит, эта лампа оказывала в 2 раза большее сопротивление прохождению тока.

Если теперь лампы включены последовательно, тот же самый ток, который прошел через первую лампу, должен пройти через вторую. Но сопротивление одной лампы в 2 раза больше сопротивления другой, поэтому на лампу с бо́льшим сопротивлением (и меньшей мощностью) придется в 2 раза большее напряжение.

Понятие сопротивления играет в электротехнике очень важную роль. Дадим более точное определение этого понятия.

Сопротивлением какого-либо участка электрической цепи называют отношение напряжения на этом участке цепи к току, проходящему по этому участку.

Иначе говоря,

$$\textit{сопротивление} = \frac{\textit{напряжение}}{\textit{ток}}.$$

---

[1] Здесь цифры не совсем точны! Они были бы верны в том случае, если бы сопротивление ламп не менялось от напряжения. На самом деле это не так (§ 2-11).

Пользуясь буквами и обозначая ток I, напряжение U, а сопротивление r или R, мы можем записать это важное соотношение так:

$$r=\frac{U}{I}.$$

Единицей электрического сопротивления является *ом.*

Сопротивлением в один ом обладает такой проводник, по которому при напряжении в один вольт проходит ток, равный одному амперу.

Сопротивление r нити рассмотренной нами 100-ваттной лампы, работающей при напряжении $U=100$ *в* и пропускающей при этом через нить ток $I=1$ *а*, равно:

$$r=\frac{U}{I}=\frac{100\ в}{1\ а}=100\ ом.$$

Сопротивление лампы 300 *вт*, 100 *в* в 3 раза меньше. Действительно, при 100 *в* через лампу проходит ток 3 *а*. Следовательно, ее сопротивление

$$r=\frac{U}{I}=\frac{100\ в}{3\ а}=33{,}3\ ом.$$

Три расчетные формулы, получившие название закона Ома. Определив сопротивление как отношение напряжения к току, мы получаем возможность вывести еще два очень важных выражения.

Ими широко пользуются при всевозможных расчетах и часто называют законом Ома (хотя это и не совсем точное название).

В самом деле, если сопротивление r равно напряжению U, деленному на ток I, то, очевидно, что

напряжение равно произведению тока и сопротивления

или

напряжение = ток × сопротивление,

или

$$U=I\cdot r.$$

Но ведь если трижды два равно шести, то три равно шести, деленному на два, т. е., прямо говоря, из предыдущего видно, что

ток равен напряжению, деленному на сопротивление,

или

$$ток = \frac{напряжение}{сопротивление},$$

или

$$I = \frac{U}{r}.$$

Три выражения, вытекающие просто из определения того, что такое сопротивление, позволяют производить расчеты по одной из трех формул:

$$r = \frac{U}{I};$$

$$U = I \cdot r;$$

$$I = \frac{U}{r}.$$

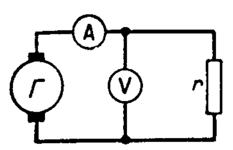


Рис. 2-18. На схеме изображено сопротивление (r) цепи, замкнутой на генератор ($Г$). Последовательно с генератором включен амперметр Параллельно с сопротивлением включен вольтметр.

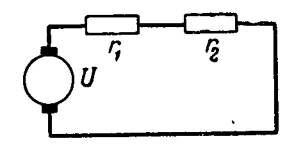


Рис. 2-19. Два последовательно включенных сопротивления r_1 и r_2. Общее сопротивление цепи равно их сумме: $r = r_1 + r_2$.

При изображении электрических цепей сопротивление обозначается прямоугольником (рис. 2-18).

Пример 1. В электрнческой цепн, изображенной на рис. 2-18, вольтметр показывает 12 *в*, а амперметр 3 *а*, т. е.

$$U = 12\ в,\ I = 3\ а.$$

Чему равно сопротивление r?

Ответ

$$r = \frac{U}{I} = \frac{12\ в}{3\ а} = 4\ ом.$$

Пример 2. Генератор, поддерживающий напряжение $U = 120\ в$, должен быть замкнут на участок цепи, обладающий сопротивлением $r = 5\ ом$.

Какой ток I установится в цепи после замыкания генератора на сопротивление (рис. 2-18)?

Ответ

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120\ в}{5\ ом} = 24\ а.$$

Пример 3. Через участок цепи, обладающий сопротивлением $r = 540\ ом$, нужно пропустить ток $I = 0{,}2\ а$. Каким должно быть напряжение U на этом участке цепи (рис. 2-18)?

Ответ

$$U = I \cdot r = 0{,}2\ а \cdot 540\ ом = 108\ в.$$

Сложение сопротивлений последовательных участков цепи. Если в цепи имеется два сопротивления, включенных последовательно одно за другим (рис. 2-19), то сопротивление цепи электрическому току будет равняться сумме этих двух сопротивлений.

В самом деле, при последовательном соединении двух участков цепи по ним протекает один и тот же ток I, а общее напряжение U равно сумме напряжений, приходящихся на первый участок U_1 и на второй участок U_2:

$$U = U_1 + U_2$$

(нам уже встречались такие примеры в § 2-4).

Если мы разделим общее напряжение на ток, то мы найдем общее сопротивление цепи

$$r = \frac{U}{I}.$$

Деля напряжение отдельных участков на тот же самый ток (ведь участки включены последовательно), мы найдем сопротивление каждого из участков:

$$r_1 = \frac{U_1}{I}; \quad r_2 = \frac{U_2}{I}.$$

Из последних формул видна справедливость нашего утверждения о том, что

общее сопротивление двух последовательно включенных сопротивлений равно их сумме

или

$$r = r_1 + r_2.$$

Пример 1. Последовательно включены два участка цепи с сопротивлениями

$$r_1 = 40 \text{ ом и } r_2 = 80 \text{ ом}.$$

Ток в этих сопротивлениях $I = 1$ *а*.

Чему равно общее сопротивление r этих двух последовательных участков?

Напряжение на первом участке

$$U_1 = I \cdot r_1 = 1\ a \cdot 40\ ом = 40\ в.$$

Напряжение на втором участке

$$U_2 = I \cdot r_2 = 1\ a \cdot 80\ ом = 80\ в$$

Общее напряжение

$$U = U_1 + U_2 = 40\ в + 80\ в = 120\ в.$$

По основному определению находим общее сопротизление, деля общее напряжение на ток

$$r = \frac{U}{I} = \frac{120\ в}{1\ a} = 120\ ом.$$

Очевидно, что тот же ответ мы получим, просто складывая сопротивления

$$r = r_1 + r_2 = 40\ ом + 80\ ом = 120\ ом.$$

Пример 2. Последовательно включены два сопротивления

$$r_1 = 5\ ом;\ r_2 = 3\ ом.$$

Ток, протекающий по ним, равен $I = 15\ a$.

Чему равно общее напряжение на двух последовательно включенных сопротивлениях?

Можно решить задачу так.

Общее сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных последовательно включенных участков

$$r = r_1 + r_2 = 5\ ом + 3\ ом = 8\ ом.$$

Общее напряжение

$$U = I \cdot r = 15\ a \cdot 8\ ом = 120\ в$$

А можно решать задачу и по-другому

Напряжение на первом участке

$$U_1 = I \cdot r_1 = 15\ a \cdot 5\ ом = 75\ в.$$

Напряжение на втором участке

$$U_2 = I \cdot r_2 = 15\ a \cdot 3\ ом = 45\ в.$$

Общее напряжение

$$U = U_1 + U_2 = 75\ в + 45\ в = 120\ в.$$

Неудивительно, что ответы совпадают.

Складывать сопротивления можно, разумеется, и тогда, когда последовательно включено не два, а три, четыре и т. д. сопротивления.

Как определить общее сопротивление при параллельном соединении и в более сложных разветвленных цепях, мы рассмотрим в § 2-18—2-19.

2-8. ЗАКОН ОМА

Опыт показывает, что сопротивление очень многих проводников не зависит от величины протекающего по ним тока.

В частности, сопротивление металлического провода определенной длины и сечения является постоянной величиной, т. е. не изменяется при пропускании по нему токов различной величины, если только при этом не изменяется его температура.

Это позволило немецкому ученому Ому установить следующий важный закон:

Ток на участке электрической цепи прямо пропорционален напряжению на концах этого участка.

Другими словами, для такого участка цепи

отношение напряжения к току остается постоянным.

Оба высказанных утверждения справедливы для большого числа проводниковых материалов.

при условии неизменности других физических условий (т. е. при неизменности температуры, давления и т. п.).

Но по определению, приведенному в предыдущем параграфе, отношение напряжения к току есть сопротивление. Значит, физический смысл закона Ома сводится к тому, что

сопротивление не зависит от величины тока.

Заметим сразу же, что закон Ома справедлив не всегда.

Как вычислить сопротивление проводника и от чего оно зависит? Этот вопрос также получил разрешение в исследованиях Ома.

Сопротивление проводника прежде всего зависит от его материала и размеров. Сопротивление проводника тем больше, чем больше его длина (ток проходит более длинный путь), и тем меньше, чем больше его поперечное сечение (ток проходит по более широкому пути).

Назовем удельным сопротивлением материала сопротивление провода, сделанного из этого мате-

риала, при его длине в 1 метр (*м*) и при его сечении в 1 квадратный миллиметр (*мм*²). В таком случае для участка цепи, образованного проволокой,

сопротивление равно удельному сопротивлению материала, умноженному на длину проводника и деленному на его сечение.

Обычно удельное сопротивление обозначается греческой буквой ρ (ро), длина — буквой l, а сечение — буквой S. Пользуясь этими обозначениями, можно записать сказанное такой математической формулой:

$$r = \rho \frac{l}{S}.$$

или

$$\textit{сопротивление} = \textit{удельное сопротивление} \times \frac{\textit{длина (м)}}{\textit{сечение (мм}^2\textit{)}}.$$

Удельное сопротивление. Лучшими материалами для проводов являются медь и алюминий. Правда, алюминиевые провода при одной и той же длине и сечении обладают бо́льшим сопротивлением, чем медные, но зато алюминий легче и дешевле.

Удельное сопротивление проводниковой меди:

$\rho = \frac{1}{56} = 0{,}0178$ *ом* на 1 *м* длины при сечении 1 *мм*².

Удельное сопротивление алюминия:

$\rho = \frac{1}{35} = 0{,}0283$ *ом* на 1 *м* длины при сечении 1 *мм*².

Пример 1. Требуется подсчитать, чему будут равны сопротивления 1 *км* медного и алюминиевого проводов сечением 35 *мм*².

Находим для медного провода

$$r = 0{,}0178 \frac{1\,000}{35} = 0{,}51 \text{ ом},$$

для алюминиевого провода

$$r = 0{,}0283 \frac{1\,000}{35} = 0{,}81 \text{ ом}.$$

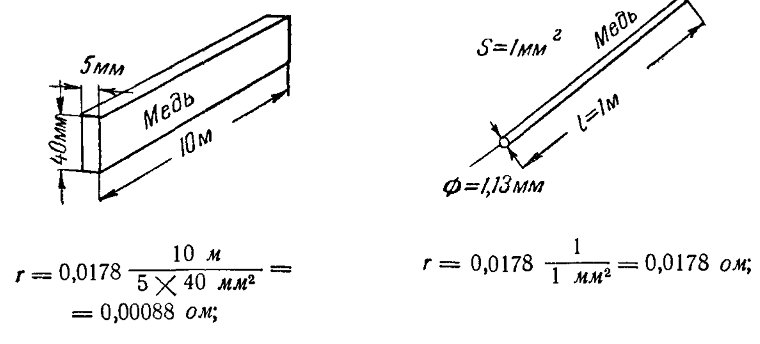
Пример 2. Подобрать сечение медного провода так, чтобы при длине 3 *км* его сопротивление равнялось не более 1,7 *ом*.

Имеем:

$$S = \frac{\rho l}{r} = \frac{0{,}0178 \cdot 3\,000}{1{,}7} = 31{,}5 \text{ мм}^2.$$

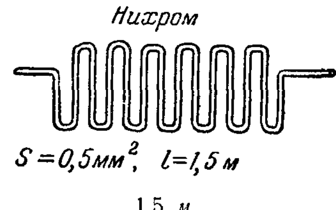
Провода такого сечения не изготовляются. Поэтому нам пришлось бы взять провод ближайшего подходящего сечения 35 *мм*².

В электротехнике часто требуются проводниковые материалы с большим сопротивлением. Тогда применяют специальные сплавы — нихром, манганин, константан и т. п.



$$r = 0{,}0178 \frac{10\ м}{5 \times 40\ мм^2} = 0{,}00088\ ом;$$

$$r = 0{,}0178 \frac{1}{1\ мм^2} = 0{,}0178\ ом;$$



$$r = 1{,}1 \frac{1{,}5\ м}{0{,}5\ мм^2} = 3{,}3\ ом.$$

Рис. 2-20. Типичные проводники и расчет их сопротивлений.

Удельные сопротивления этих материалов в омах на 1 *м* длины при сечении 1 *мм*² равны:

для константана 0,46 (сплав никеля, меди и марганца);

для нихрома 1,1 (сплав никеля, хрома и железа);

для манганина 0,5 (сплав меди, марганца, никеля и железа).

2-9. ПОЧЕМУ ЦЕПИ, ПОДЧИНЯЮЩИЕСЯ ЗАКОНУ ОМА, НАЗЫВАЮТ ЛИНЕЙНЫМИ?

Закон Ома позволяет нам вычислять величину тока в проводниках при различных значениях приложенного напряжения. Наоборот, зная приложенное к проводнику напряжение, по закону Ома можно вычислить проходящий по нему ток.

Пусть, например, у нас имеется катушка медной проволоки с сопротивлением 40 *ом*. Требуется определить значения токов в катушке, если приложенное напряжение изменяется от нуля до 120 *в* и если температура катушки остается постоянной.

Задаваясь рядом значений тока I и умножая их на сопротивление ($r=40$ *ом*), найдем ряд соответствующих значений напряжения. По закону Ома

$$U=I\cdot r.$$

При $r=40$ *ом* находим, что

току $I=0{,}25$ *а* соответствует напряжение $U=10$ *в*;
току $I=1$ *а* — напряжение $U=40$ *в* и т. д.

В следующей таблице представлены соответствующие друг другу значения токов и напряжений для $r=40$ *ом*.

$I=0{,}25$	1	1,5	2	3 *а*
$U=10$	40	60	80	120 *в*

Представим на графике найденную зависимость. Для этого возьмем лист клетчатой бумаги и проведем под прямым углом две оси (рис. 2-21); на горизонтальной оси мы будем отсчитывать токи, на вертикальной — напряжения.

Выбираем масштабы нашей диаграммы: пусть 1 *а* соответствует пяти клеткам по горизонтальной оси, а 10 *в* — одной клетке по вертикальной оси.

Для того чтобы на диаграмме поставить точку, изображающую последнюю пару значений

$$U=120\ в,\ I=3\ а,$$

проведем две прямые линии: горизонтальную от отметки 120 *в* и вертикальную от отметки 3 *а*. Точка пересечения этих линий (точка A) соответствует этим значениям.

Соединим найденную точку A прямой линией с нижним левым углом диаграммы (точка O).

Теперь нетрудно убедиться, что любой паре найденных нами значений U и I соответствуют точки, лежащие именно на этой прямой: проведя вертикальную линию от отметки 1 *а*, найдем, что она пересечет нашу прямую на уровне 40 *в*.

Пользуясь тем же графиком, можно легко найти значения тока в катушке при любом заданном напряжении

Пусть нам требуется найти ток в катушке при напряжении 70 *в*. Для этого проводим горизонтальную линию на уровне 70 *в* до пересечения с нашей наклонной прямой (точка *B*), а из точки *B* опускаем перпендикуляр на ось отсчета токов. Этот перпендикуляр встретит ось токов между отметками *1* и *2*. Следовательно, искомый ток больше

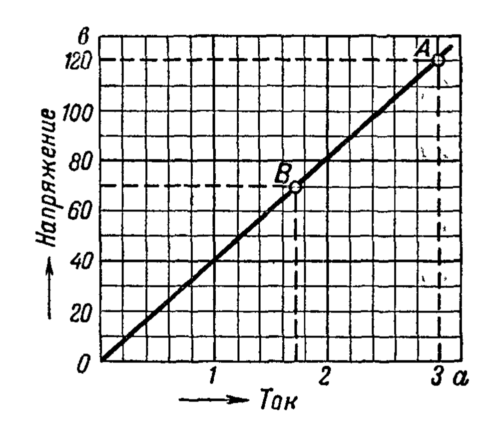


Рис. 2-21. Графическое изображение зависимости между током и напряжением на участке цепи, подчиняющемся закону Ома.

одного, но меньше двух ампер. Чтобы уточнить этот результат, замечаем, что одной клетке соответствует 0,20 *а*, а точка встречи лежит в четвертой клетке. Следовательно, искомый ток больше чем в 1,6 *а* и меньше чем 1,8 *а*. Эти пределы можно сузить еще больше; эта точка лежит ближе к правому краю клетки и, следовательно, ток больше чем 1,7 *а*, но меньше чем 1,8 *а*, т. е. может быть принят равным 1,75 *а*.

Зависимость между током и напряжением, выражаемая законом Ома, представляется на графике прямой линией.

Поэтому цепи или участки цепей, подчиняющиеся закону Ома, называют линейными.

2-10. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ

Во многих естественных проводниковых материалах, а еще чаще в искусственно изготовленных частях (элементах) электрической цепи зависимость между напряжением и током не подчиняется закону Ома.

Проделаем простой опыт с такими элементами электрической цепи. Возьмем, например, бареттер, представляющий собой стеклянную колбу (лампочку), внутри которой в атмосфере водорода находится тонкая железная нить. Ток подводится к ней через две металлические проволоки, впаянные в стекло.

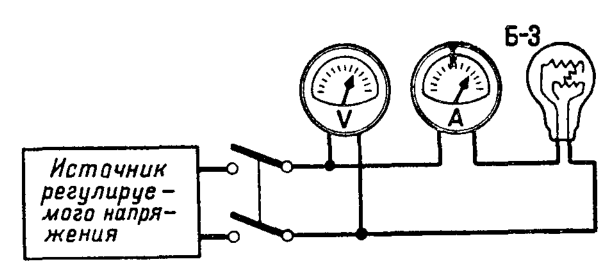


Рис. 2-22. Схема для определения зависимости тока от напряжения в бареттере (Б-3). Цепь присоединяется к источнику (генератору), напряжение которого можно легко регулировать.

Включим последовательно с бареттером амперметр, параллельно ему — вольтметр и присоединим образовавшуюся цепь к источнику регулируемого напряжения (рис. 2-22).

Постепенно изменяя напряжение источника, будем записывать показания приборов, а потом нанесем соответствующие значения на диаграмму.

При изменении напряжения от нуля до 4 *в* мы наблюдаем постепенное возрастание тока до величины 0,7 *а* (таблица и рис. 2-23).

Соответствующие значения тока и напряжения бареттера измеренные по схеме рис. 2-22

$U=0$	2	4	8	11	16	18	20 *в*
$I=0$	0,4	0,7	0,93	0,99	1,00	1,05	1,20 *а*

При дальнейшем возрастании напряжения до 8 *в* мы наблюдаем н е у д в о е н и е т о к а (как это следовало бы из закона Ома), а лишь незначительное увеличение тока до 0,93 *а*.

Дальнейшее возрастание напряжения до 18 *в* сопровождается увеличением тока на еще меньшую величину.

Если во время описания опыта следить не только за приборами, но и за самим бареттером, то мы увидим, что по мере возрастания напряжения нить начинает все сильнее и сильнее светиться. Когда напряжение поднимается до 18 *в*, нить светится уже очень ярко.

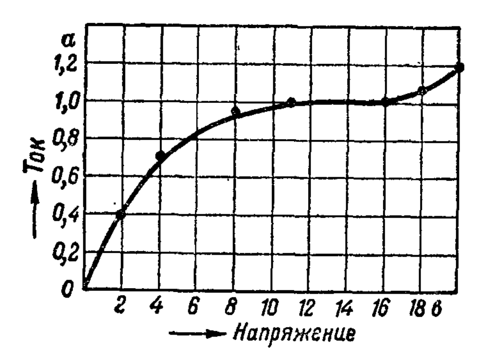


Рис. 2-23. Электрическая характеристика бареттера.

По горизонтальной оси отложены значения напряжения (одной клеточке соответствуют 2 *в*). По вертикальной оси отложены соответствующие значения тока (одной клеточке соответствует ток 0,2 *а*).

Кривая, проведенная на диаграмме, проходит через точки, нанесенные в соответствии с данными таблицы. Пользуясь этой кривой, можно с достаточным приближением оценить значения тока, соответствующие промежуточным значениям напряжения. Так, например, легко найти, что напряжению 7 *в* должен соответствовать ток 0,9 *а*.

При дальнейшем повышении напряжения снова наблюдается довольно значительный подъем тока. Однако подъем напряжения до таких величин уже угрожает целости нити.

Из приведенных данных опыта, а также из диаграммы (рис. 2-23), где жирные точки соответствуют данным опыта, видно, что к бареттеру

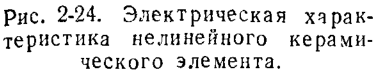
неприменим закон Ома

и что электрическая характеристика бареттера уже не выражается прямой линией. Бареттер представляет собой

нелинейный элемент электрической цепи.

Техническое назначение бареттера подсказывается видом диаграммы: последовательное включение бареттера

между источником питания (генератором) и потребителем поддерживает ток неизменным, несмотря на возможные колебания напряжения источника. Бареттеры часто включают последовательно с нитью накала электронных ламп в радиоприемниках.



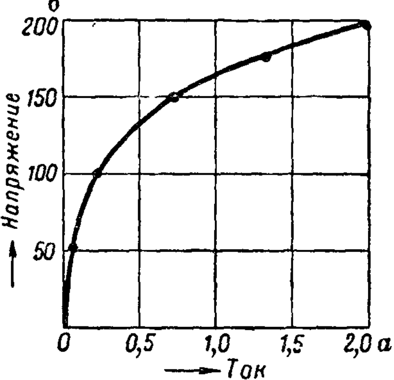


Рис. 2-24. Электрическая характеристика нелинейного керамического элемента.

По горизонтальной оси отложен ток. По вертикальной — напряжение. При росте напряжения материал резко улучшает свои проводниковые свойства При недопустимом подъеме напряжения элемент как бы замыкает провода накоротко. Его действие похоже на открывание предохранительного клапана в паровой установке: клапан автоматически открывается при чрезмерном повышении давления.

На рис. 2-24 показана электрическая характеристика другого нелинейного элемента, представляющего собой особым образом обожженную глину, смешанную с углем и другими проводящими материалами. Он применяется для отвода тока при чрезмерном повышении напряжения.

2-11. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

Говоря о законе Ома (§ 2-8), мы подчеркивали требование неизменности таких физических условий, как температура и давление. Дело в том, что обычно сопротивление проводников зависит от температуры:

сопротивление металлических проводов увеличивается с нагреванием.

Для медных проводов увеличение температуры на каждые 2,5° С вызывает увеличение сопротивления приблизительно на 1% (на одну сотую их первоначального сопротивления), или сопротивление увеличивается на 0,4% при подъеме температуры на 1° С. Те значения удельных сопротивлений, которые были приведены выше, соответствуют температуре 20° С.

Пример 1. Покажем, как можно подсчитать удельное сопротивление при изменении температуры.

Пусть, например, требуется определить удельное сопротивление меди при температуре 45° С.

Мы знаем, что при 20° С оно было равно 0,0178 *ом* на 1 *м* длины при сечении 1 *мм*². Мы знаем, что каждые 2,5° С оно возрастает на 1%, т. е. на

$$\frac{0{,}0178}{100} = 0{,}000178.$$

Новая температура превосходит 20°С на 25°С.

Значит, искомое удельное сопротивление на 10% больше, чем 0,0178:

уд. сопрот. при $45°C = 0{,}0178 + 10\,\frac{0{,}0178}{100} = 0{,}0196$ *ом* на 1 *м* при 1 *мм*².

Зависимостью сопротивления от температуры часто пользуются для определения температуры медных проводов в электрических машинах.

Этой же зависимостью сопротивления от температуры пользуются для устройства электрических термометров, основанных на измерении сопротивления куска проволоки (часто намотанного в форме спирали), расположенного в том помещении, температуру которого хотят определить.

При таком измерении температуры легко сосредоточить в одном месте наблюдение за температурой разных частей помещения (например, в холодильниках) или разных частей промышленных установок.

При этом можно пользоваться единственным стрелочным измерительным прибором, переводя переключатель в разные положения: при каждом новом положении для измерения включаются проволочные спирали, расположенные, например, на разных этажах холодильника.

Пример 2. Сопротивление обмотки электрической машины при 20° С было равно 60 *ом*. После часовой работы машины сопротивление обмотки возросло до 69,6 *ом*. Определить, насколько нагрелась обмотка если при повышении температуры на каждые 10° С сопротивление увеличивается на 4%?

Прежде всего ищем, на сколько процентов увеличилось сопротивление:

$$\frac{69{,}6\,ом - 60\,ом}{60\,ом} \cdot 100 = 16\%.$$

Теперь легко находим, что температура возросла на 40° С, т. е. стала равной 20+40=60° С.

Мы знаем, что сопротивление зависит от температуры. Поэтому естественно теперь должны возникнуть два вопроса.

Первый вопрос: не меняется ли сопротивление электрических ламп, когда в них накаляется нить?

Ответ. Да, конечно, сопротивление нити холодной лампы меньше, чем сопротивление в рабочем состоянии. К этому и относилось наше примечание, сделанное в § 2-7.

Второй вопрос: не объясняется ли электрическая характеристика бареттера (§ 2-10) тем, что по мере увеличения тока нить разогревается и возрастает ее сопротивление?

Ответ. Да, именно этим. По мере увеличения тока нить нагревается сильнее и сильнее, ее сопротивление растет, а поэтому для небольшого (почти незаметного) увеличения тока может потребоваться значительное увеличение напряжения.

Заметим только, что очень часто нелинейность характеристики объясняется чисто электрическими явлениями. Так обстоит дело в случае керамического материала, характеристика которого приведена на рис. 2-24.

В ряде измерительных приборов и в специальной аппаратуре часто требуется, чтобы их сопротивление не изменялось с температурой. Для таких изделий разработаны сплавы, сопротивление которых практически не зависит от температуры.

Из таких сплавов чаще всего пользуются манганином и константаном.

Многие проводники заметно изменяют свое сопротивление при их растяжении или сжатии. Это свойство проводников тоже нашло важное техническое применение: в настоящее время часто по изменению электрического сопротивления специально изготовленных элементов судят о давлениях и малых перемещениях, возникающих, например, при нагрузках балок, рельсов, частей машины и т. п.

2-12. ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА И ЗАКОН ЛЕНЦА—ДЖОУЛЯ

Если в цепи есть ток, провода, по которым он протекает, нагреваются.

Нагревание проводов, предназначенных, например, для осветительной сети, должно быть невелико, так как иначе может разрушиться их изоляция и даже произойти пожар. Наоборот, проволока, скрученная в спирали для электрических плиток или кипятильников, должна нагреваться до очень высокой температуры.

Трудно заметить нагревание провода 4 *мм*², когда по нему проходит ток 5 *а*. Но попробуйте пропустить через



Эмилий Христианович Ленц (1804—1865 гг.).

такой провод ток 200 *а* — провод очень скоро сильно нагреется. Если же взять провод сечением 120 *мм*², то нагревание, которое в этом случае будеть производить ток 200 *а*, также будет очень незначительно.

Но нагревание проводов, хотя бы и слабое, все же обязательно сопутствует току.

Чем больше ток в проводах, тем сильнее они греются.

Нагревание проводов током служило предметом исследований акад. Э. Х. Ленца (в Петербурге в первой половине прошлого столетия). Независимо от него такие же исследования в Англии проводил Джоуль. Открытый ими закон и получил название закона Ленца—Джоуля:

Количество тепловой энергии, ежесекундно выделяющееся в проводнике сопротивления r, когда по нему проходит ток I, выражается формулой

$$\frac{\textit{тепловая энергия}}{\textit{время прохождения тока}} = \textit{ток} \times \textit{ток} \times \textit{сопротивление}.$$

Так как частное отделения энергии на время равно мощности, то

$$\textit{мощность} = \textit{ток} \times \textit{ток} \times \textit{сопротивление}$$

или, пользуясь буквенными обозначениями[1]:

$$P = I \cdot I \cdot r.$$

Приведенные формулы показывают, что

при удвоении тока мощность увеличивается вчетверо.

---

[1] Вместо того, чтобы одну и ту же величину писать множителем 2 раза, т. е. $I \cdot I$, часто пишут I^2. Цифра 2, стоящая над обозначением величины, показывает, что величина входит множителем дважды. Выражение I^2 обычно читают так: квадрат тока или I квадрат.

Конечно, это верно при неизменности сопротивления. Если

вдвое увеличить сопротивление, вдвое увеличится и мощность.

Конечно, при условии неизменности тока.

Для того чтобы мощность оказалась выраженной в ваттах, ток следует выражать в амперах, а сопротивление — в омах.

Обратим внимание на то, что закон Ленца — Джоуля можно было бы вывести из ранее данного выражения:

$$\textit{мощность} = \textit{ток} \times \textit{напряжение},$$

если в нем второй множитель, т. е. напряжение, представить как произведение тока и сопротивления (закон Ома):

$$\textit{напряжение} = \textit{ток} \times \textit{сопротивление}.$$

При помощи закона Ома можно придать закону Ленца — Джоуля и такую форму:

$$\textit{мощность} = \frac{\textit{напряжение} \times \textit{напряжение}}{\textit{сопротивление}}$$

или

$$P = \frac{U \cdot U}{r} = \frac{U^2}{r},$$

очень удобную в тех случаях, когда сопротивление r присоединяется непосредственно к сети известного напряжения.

Пример 1. К напряжению $U = 200$ *в* приключена лампа с сопротивлением $r = 800$ *ом*. Определить мощность лампы.

По закону Ленца — Джоуля находим, что мощность равна

$$P = \frac{U^2}{r} = \frac{200\ \textit{в} \times 200\ \textit{в}}{800\ \textit{ом}} = 50\ \textit{вт},$$

что соответствует току

$$I = \frac{P}{U} = \frac{50\ \textit{вт}}{200\ \textit{в}} = 0{,}25\ \textit{а}.$$

Пример 2. Электрическая печка состоит из нихромовой проволоки, намотанной на фарфоровый каркас. Когда эта обмотка присоединяется к сети напряжением 240 *в*, печь потребляет мощность 960 *вт*. Найти, какой ток подводится при этом из сети, а также каковы будут мощность и ток, если напряжение уменьшится в 2 раза, а сопротивление останется неизменным.

Решение. Прежде всего, зная мощность $P = 960$ *вт* и напряжение $U = 240$ *в*, легко найдем соответствующий ток:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{960 \text{ вт}}{240 \text{ в}} = 4 \text{ а}.$$

Зная ток и напряжение, мы теперь легко можем найти сопротивление нихромовой обмотки печи по закону Ома:

$$r = \frac{U}{I} = \frac{240 \text{ в}}{4 \text{ а}} = 60 \text{ ом}.$$

Предполагая, что сопротивление печи останется таким же и при напряжении, в 2 раза меньшем (120 *в*), найдем ток, который будет подводиться при этом из сети

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120 \text{ в}}{60 \text{ ом}} = 2 \text{а}.$$

Мощность печи теперь будет равна:

$$P = I \cdot U = 2 \cdot 120 = 240 \text{ вт}.$$

Таким образом, мы видим, что уменьшение напряжения в 2 раза сопровождается уменьшением мощности в 4 раза.

Пример 3. Два нагревательных прибора, имеющих сопротивление один 10 *ом*, другой 20 *ом*, присоединены параллельно к сети напряжением 100 *в*. Найти мощность, т. е. количество тепловой энергии, выделяющееся в первом и во втором приборах за 1 *сек*.

Решение. По закону Ома находим, что ток в первом приборе равен.

$$I_1 = \frac{100 \text{ в}}{10 \text{ ом}} = 10 \text{ а},$$

а во втором

$$I_2 = \frac{100 \text{ в}}{20 \text{ ом}} = 5 \text{ а},$$

откуда мощность первого прибора

$$P_1 = I_1 \cdot I_1 \cdot r_1 = 10 \text{ а} \cdot 10 \text{ а} \cdot 10 \text{ ом} = 1\,000 \text{ вт}$$

и второго

$$P_2 = I_2 \cdot I_2 \cdot r_2 = 5 \text{ а} \cdot 5 \text{ а} \cdot 20 \text{ ом} = 500 \text{ вт}.$$

Нетрудно убедиться в том, что если бы эти два прибора были включены последовательно (через них проходил бы одинаковый ток) мощность, выделяющаяся во втором приборе, была бы больше.

Пример 4. Через сопротивление $r = 20$ *ом* проходит ток $I = 5$ *а* Чему равна мощность P, потребляемая в этом сопротивлении, т. е количество тепловой энергии, выделяющееся в этом сопротивлении за 1 *сек*?

Решение. По закону Ленца — Джоуля находим:

$P = I : I : r = 5$ *а* $: 5$ *а* $: 20$ *ом* $= 500$ джоулей в секунду, или 500 *вт*.

2-13. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ И ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Мы уже говорили, что при протекании тока провода нагреваются, но что при правильно подобранных сечениях проводов этот нагрев очень мал. Он, однако, может достичь опасной величины при коротком замыкании проводов, т. е. при непосредственном их соприкосновении. При этом в замкнутой цепи тока вместо большого сопротивления приемника оказывается включенным лишь малое сопротивление проводов, вследствие чего (закон Ома!) в такой цепи произойдет заметное увеличение тока (ток короткого замыкания).

Пример. От генератора идут медные провода сечением 35 *мм*².

На расстоянии 0,5 *км* от этих проводов сделана отпайка тоже медным проводом, имеющим сечение 4 *мм*². Длина этой отпайки 50 *м*. Напряжение генераторов 130 *в* (рис. 2-25).

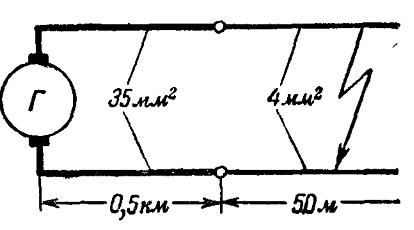


Рис. 2-25. Короткое замыкание в линии.

Найдем, какой ток пойдет по цепи, если на конце нашей отпайки нарушится изоляция между проводами и провода придут в соприкосновение. Иначе говоря, требуется найти, чему будет равен ток при коротком замыкании в конце цепи.

Чтобы определить ток, мы можем воспользоваться законом Ома. Действительно, мы знаем напряжение генератора (U=130 *в*) и легко можем подсчитать сопротивление проводов нашей цепи. Общее сопротивление нашей цепи сложится из сопротивления 1 *км* провода сечением 35 *мм*² и из сопротивления 100 *м* провода сечением 4 *мм*² (вычисляя длину проводов, мы учитываем как прямой, так и обратный пути тока). Сопротивление 1 *км* медного провода сечением 35 *мм*² нами уже было подсчитано (§ 2-8), оно равно 0,51 *ом*.

Сопротивление 100 *м* медного провода сечением 4 *мм*² равно:

$$0{,}0178\frac{100}{4} = 0{,}44 \text{ ом}.$$

Следовательно, общее сопротивление всей цепи

$$r = 0{,}51 \text{ ом} + 0{,}44 \text{ ом} = 0{,}95 \text{ ом}.$$

По закону Ома находим ток:

$$I = \frac{U}{r} = \frac{130 \text{ в}}{0{,}95 \text{ ом}} = 137 \text{ а}.$$

Этот ток — ток короткого замыкания — значительно превосходит ту наибольшую величину тока (порядка 25 *а*), которая может протекать по проводам сечением 4 *мм*², не вызывая их заметного нагревания.

Мы убедились в том, что при коротком замыкании ток резко возрастает. Но мы взяли в качестве примера установку низкого напряжения и довольно большое сопротивление проводов (провода небольшого сечения). В мощных установках высокого напряжения ток короткого замыкания может значительно превосходить 1 000 *а*.

Если только цепь тока, в которой произошло короткое замыкание, не будет очень скоро тем или другим способом разорвана, провода сильно нагреются. Иногда провода могут даже расплавиться или же на них может начать гореть изоляция. Кроме опасности таких явлений, при коротком замыкании большая мощность будет совершенно бесполезно расходоваться на нагрев проводов.

Поэтому во всех электротехнических установках должно быть

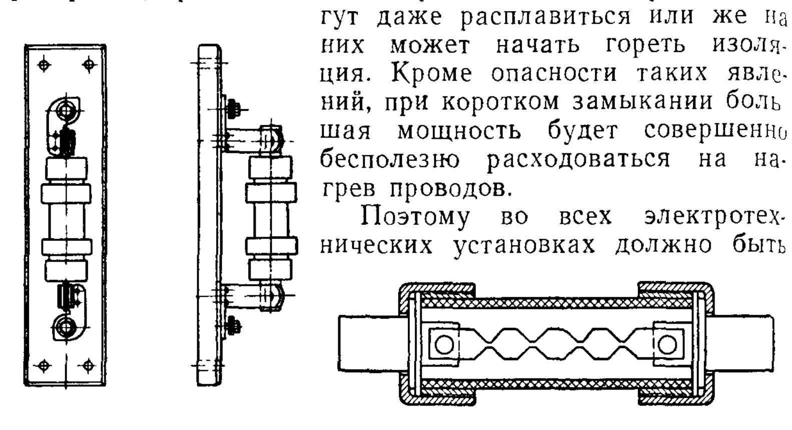


Рис. 2-26. Плавкие вставки.

предусмотрено автоматическое отключение от генератора участка цепи, на котором произошло короткое замыкание.

Плавкие предохранители. Простейшим устройством для такого отключения являются плавкие предохранители. Плавкий предохранитель представляет собой тонкую проволоку (или пластинку с одним или несколькими сужениями — рис. 2-26), включенную в рассечку проводов, как это показано на рис. 2-27.

При протекании ненормально большого тока (ненормально большого для данных проводов) особенно сильно начинают нагреваться именно эти проволоки, так как их сечение всегда берется значительно меньшим, чем сечение предохраняемых проводов. В результате они расплавляются и прерывают цепь тока.

Плавкие вставки для разных сечений защищаемых проводов и для разных потребителей энергии, разумеется, берутся различные. Плавкие предохранители действительно выполняют свою задачу только тогда, когда они правильно

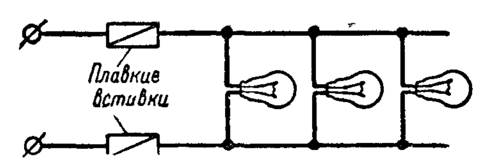


Рис. 2-27. Включение плавких предохранителей.

выбраны: плавкая вставка для провода 16 *мм*² не будет достаточно защищать провод сечением 4 *мм*².

Для прерывания больших токов и при высоких напряжениях плавкие предохранители применяются редко; в этих установках устраивается иного рода автоматическая защита.

2-14. УСТРОЙСТВО ТЕПЛОВЫХ АМПЕРМЕТРОВ И ВОЛЬТМЕТРОВ

Тепловым действием тока иногда пользуются для устройства электроизмерительных приборов.

Тепловой амперметр (рис. 2-28), основанный на свойстве тока нагревать провода, устроен так: к двум неподвижным зажимам присоединена тонкая проволока. Эта

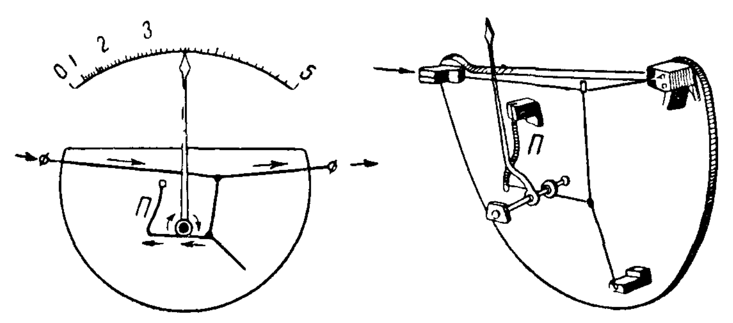


Рис. 2-28. Тепловой амперметр.
Буквой *П* обозначена пружина.

проволока оттянута книзу шелковой нитью, связанной с пружиной. По пути эта нить петлей охватывает подвижную ось, на которой укреплена стрелка.

Измеряемый ток подводится к неподвижным зажимам и проходит через проволоку (путь тока показан стрелками). Под действием тока проволока немного нагреется. От нагревания она чуть-чуть удлинится, и шелковая нить, прикрепленная к проволоке, оттянется пружинкой. Движение нити повернет ось и сидящую на ней стрелку.

3*

По отклонению стрелки и определяют величину тока: чем больше ток, тем больше нагревается нить, тем больше поворачивается стрелка.

Вольтметр. Итак, мы знаем, как можно устроить прибор, измеряющий ток. Но как измерить напряжение? Воспользуемся законом Ома. Ведь ток, протекающий в данной цепи, определяется величиной напряжения. Поэтому, если известно, сопротивление прибора и известен ток, протекающий через него, мы сразу можем определить и величину напряжения, приложенного к прибору.

Пусть, например, мы имеем миллиамперметр[1] с внутренним сопротивлением 750 *ом*.

Пусть после включения прибора между двумя какими-либо точками цепи стрелка прибора показывает, что через него проходит ток 20 *ма* (0,02 *а*). Значит, напряжение между этими точками равно:

$$750\ ом \cdot 0{,}02\ а = 15\ в.$$

Особенности вольтметра и амперметра. Казалось бы, амперметры и вольтметры могут взаимно заменять друг друга. Но в большинстве случаев это не так: обычно в о л ь т м е т р ы и м е ю т настолько б о л ь ш о е с о п р о т и в л е н и е, что последовательное включение вольтметра равносильно разрыву цепи; напротив, *амперметры имеют* настолько *малое сопротивление*, что включение амперметра прямо на сеть (а не последовательно с потребителем) равносильно короткому замыканию.

Необходимость того, чтобы вольтметры обладали большим сопротивлением, а амперметры — малым, вытекает из самого характера включения этих приборов в сеть (рис. 2-14).

Вольтметр, включенный параллельно с потребителем, должен потреблять возможно малый ток, а амперметр, включенный последовательно с потребителем, должен брать на свою долю возможно малое напряжение. Это значит, что сопротивление амперметра должно быть возможно малым, а сопротивление вольтметра должно быть возможно большим.

Пример. Амперметр обладает сопротивлением 0,05 *ом* и включен последовательно с группой ламп, потребляющих ток 10 *а* при напряжении 120 *в*.

---

[1] Миллиамперметром называется прибор для измерения малых токов—миллиамперов. 1 *ма*=0,001 *а*

Вольтметр включен параллельно с лампами и обладает сопротивлением 2 000 *ом*.

Требуется найти напряжение, ток и мощность, потребляемые вольтметром и амперметром.

Решение. Напряжение на зажимах амперметра равно по закону Ома:

$$10\ a \cdot 0{,}05\ ом = 0{,}5\ в.$$

Мощность, потребляемая амперметром, следовательно, равна

$$0{,}5\ в \cdot 10\ a = 5\ вт.$$

Ток, проходящий через вольтметр, равен по тому же закону

$$\frac{120\ в}{2\,000\ ом} = 0{,}06\ a,$$

и мощность, потребляемая вольтметром,

$$0{,}06\ a \cdot 120\ в = 7{,}2\ вт.$$

Из рассмотренных свойств амперметра и вольтметра понятно, почему во всех рассмотренных примерах электрических цепей мы не учитывали сопротивления амперметров и токов, ответвляющихся в вольтметры.

2-15. НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА И ЕГО ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ

По тепловому действию тока можно определить его величину. Но ток определяется не только величиной, а еще и направлением. О направлении тока можно судить по его механическому взаимодействию с магнитами (см. следующую главу) или по химическому действию тока.

Если ток протекает по металлическому проводниковому контуру, то как бы ни был велик ток и как бы долго он ни протекал, никаких изменений в составе металла не происходит. Но возьмем концы проводов, идущих от генератора, и присоединим их к медным пластинам, опущенным в стеклянный сосуд с раствором медного купороса (рис. 2-29). Раствор медного купороса — проводник, поэтому в нашем случае будет существовать замкнутая цепь.

Протекание тока в такой цепи теперь будет связано с определенными химическими явлениями: на одной из пластин, опущенных в раствор купороса, начнет осаждаться медь, напротив, другая пластина будет разъедаться, и медь с нее будет переходить в раствор.

Таким образом, медь как бы переносится током с одной пластины на другую. Направление, в котором происхо-

дит перенос металла в растворе, условно принимается за положительное направление тока.

Переменим местами концы проводов, присоединенных к пластинам. Что при этом произойдет?

Та пластина, на которой раньше осаждалась медь, теперь будет разъедаться, а на пластине, которая разъедалась, теперь будет осаждаться медь. Значит, ток между

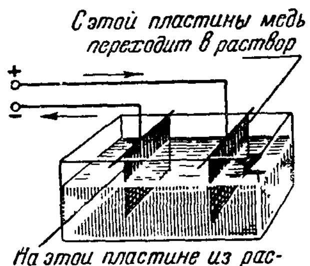


Рис. 2-29. Ток в растворе медного купороса.

Медь переносится с положительной пластины на отрицательную.

⊕
⊖
Генератор
Внешняя часть цепи

Рис. 2-30. Во внешней части цепи ток идет от положительного зажима генератора (+) к отрицательному (—). Во внутренней части цепи, т. е. в самом генераторе, ток идет от (—) к (+). Замкнутую цепь ток обтекает в одном направлении (показанном стрелками).

пластинами изменил направление, а это в свою очередь значит, что ток в проводах, соединенных с генератором, так же как и ток в самом генераторе, сохранил прежнее направление. Этому нетрудно найти естественное объяснение: генератор продолжает работать так же, как он работал раньше, и, следовательно, стремится посылать ток в прежнем направлении.

Для того чтобы знать, в каком направлении генератор будет посылать ток, его зажимы обозначаются знаками + (плюс) и — (минус) и называются соответственно положительным и отрицательным.

Знаком + обозначают зажим, из которого ток выходит во внешнюю часть цепи, знаком — обозначают тот зажим, через который ток возвращается в генератор (рис. 2-30).

Во внешней цепи ток идет от положительного (+) зажима к отрицательному (—) зажиму. Внутри генератора ток идет от — зажима к + зажиму.

Химические явления, подобные только что показанным, наблюдаются не только в растворе медного купороса. При

протекании тока через растворы щелочей и кислот, через раствор азотнокислого серебра и т. п. также наблюдаются различные химические превращения[1].



Борис Семенович Якоби (1801—1874 гг.).

При этом химический процесс на одной и другой сторонах металлической цепи, замкнутой через электролит, всегда бывает различным. Это делает понятной необходимость различать направление тока. Однако различать направление тока надо и для того, чтобы знать, как будут происходить его магнитные действия (гл. 3).

Кроме того, существуют нелинейные элементы, оказывающие различное сопротивление току в зависимости от его направления (§ 2-17).

Электрохимические явления имеют большое значение в промышленности.

Первым применением электрохимии было получение медных отпечатков (медных форм) по способу, открытому в России в середине прошлого века инженером, акад. Б. С. Якоби.

Переменный ток. На практике чаще всего применяются генераторы, дающие переменный ток, т. е. ток, все время изменяющий направление, — ток течет то в одну, то в другую сторону (в обычных сетях переменного тока он меняет свое направление 100 раз в секунду)[2]. Если электролитическую цепь питать переменным током, химические изменения в ней будут незаметны.

Если, например, взять опять тот же раствор медного купороса и присоединить его к источнику переменного тока, ток в электролите будет протекать и будет выделять медь то на одной, то на другой пластине, причем на противоположной пластине в это же время будет происходить переход меди в раствор.

---

[1] Все виды проводящих веществ, протекание тока через которые связано с химическими превращениями, называют электролитами.

[2] Переменному току посвящена шестая глава этой книги.

То ничтожное количество меди, которое успеет выделиться за одну сотую долю секунды, в следующий промежуток времени вновь будет переходить в раствор.

Тепловое действие не зависит от направления тока, поэтому переменный ток может спокойно применяться для ламп накаливания, электрических печей и т. п.

Тепловые вольтметр и амперметр одинаково пригодны для измерения постоянного (по направлению) и переменного тока.

2-16. АККУМУЛЯТОРЫ И ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Остановимся еще на кратком описании того, как нужно понимать работу аккумуляторных батарей. Что значит: «аккумулятор разрядился»? Что происходит при его зарядке?

Химические процессы происходят с выделением энергии или с поглощением энергии. Начнем с одного примера из химии. Водород [1], сгорая, т. е. соединяясь с кислородом [2] выделяет громадное количество тепла. Хорошо известна высокая температура водородного пламени, применяемого для сварки и резания металлов.

В результате соединения водорода с кислородом образуется водяной пар. Охлаждаясь, этот пар становится водой. Вода — одно из соединений водорода с кислородом — под влиянием определенных воздействий может быть снова разложена на водород и кислород. Однако для такого разложения нужно затратить определенную энергию.

Таким образом, сгорание водорода сопровождалось бурным выделением энергии. Напротив, разложение воды будет сопровождаться поглощением энергии. Эта энергия вновь будет выделена при сжигании полученного водорода. Правда, при разложении воды придется перерасходовать энергию на побочные явления, не связанные непосредственно с разложением воды.

Примеров такого рода химических процессов, поглощающих или выделяющих энергию, можно привести очень много. Одним из таких процессов являются и те изменения, которые происходят по действием тока, протекающего через аккумуляторную батарею.

---

[1] Бесцветный газ, применявшийся, между прочим, для заполнения аэростатов и дирижаблей, так как он легче воздуха.

[2] Одна из составных частей воздуха, необходимая нам в процессе дыхания. Горение дров, угля светильного газа и т. п. представляет собой не что иное, как процесс их соединения с кислородом.

Разрядка и зарядка аккумуляторов. Аккумулятор посылает ток в определенном направлении. Если включить его в замкнутую цепь, то в ней будет протекать ток, в этой цепи будет происходить выделение энергии (например, нагревание проводов в соответствии с законом Ленца — Джоуля). В самом аккумуляторе при этом будет происходить химический процесс, подобный как бы горению (например, соединению водорода с кислородом).

Аккумулятор сможет давать ток до тех пор, пока в нем не израсходуется запасенная химическая энергия, пока он не разрядится. Пока аккумулятор питает электрическую цепь, ток внутри аккумулятора направлен от —зажима к + зажиму.

Для того чтобы заставить ток протекать через аккумулятор в противоположном направлении, он должен быть присоединен к зарядному генератору. Когда ток будет идти в противоположном направлении, внутри аккумулятора будет происходить другой химический процесс, связанный уже с поглощением, а не с выделением энергии (в этом случае мы имеем явление, подобное разложению воды на ее составные части).

На основании всего сказанного можно ответить на вопрос, что значит аккумулятор разрядился?

Это значит, что энергия, запасенная в нем в форме определенных химических соединений, в значительной мере израсходовалась.

При зарядке аккумуляторов, напротив, происходят химические процессы (образование определенных соединений), поглощающие энергию, которая потом может быть получена обратно (при распаде образовавшихся соединений). Однако и в этом случае энергия, полученная при зарядке аккумулятора, будет неминуемо больше той, которую аккумулятор отдает, работая генератором: при зарядке аккумуляторов заметная часть энергии расходуется непроизводительно.

Гальванические элементы. Гальванические элементы или гальванические батареи (т. е. ряд последовательно или параллельно соединенных элементов) отличаются от аккумуляторов тем, что израсходованная ими энергия не может быть снова сообщена им посредством пропускания через них тока в обратном направлении. После того как энергия гальванических элементов израсходована, после их «сгорания», они уже приходят в негодность.

Обозначение электрохимических генераторов. Гальванические элементы и аккумуляторы обозначаются на электрических схемах, как это показано на рис. 2-35.

2-17. НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА И ВЫПРЯМЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Исключительно широкое применение на практике получили устройства, имеющие нелинейную характеристику (§ 2-10), обладающие такой особенностью: они хорошо проводят ток в одном направлении и плохо проводят ток в другом направлении.

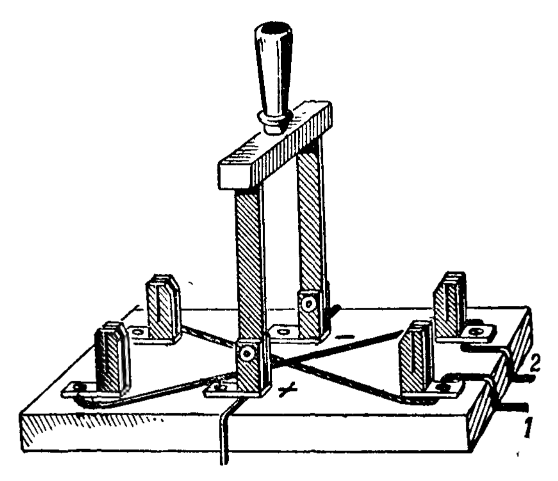


Рис. 2-31. На рисунке изображен рубильник, служащий для перемены направления тока у потребителя.

Проследите внимательно за направлением тока при левом и правом положениях рубильника.

Знаками + и — показаны концы проводов, идущих от генератора. Знаками 1 и 2 обозначены провода, идущие к потребителю. При левом положении рубильника ток от плюса (+) идет по ближнему концу рубильника и по черному проводу к проводу, обозначенному цифрой 2.

Пройдя по внешней части цепи, ток возвращается через провод 1, проходит через полосатый провод и по дальнему ножу рубильника возвращается к зажиму (—).

При правом положении рубильника направление тока во внешней цепи изменится (проверьте это самостоятельно).

Электрическую характеристику таких устройств можно получить по ранее применявшейся схеме (рис. 2-22), дополненной рубильником, предназначенным для перемены направления тока: в зависимости от положения рубильника (рис. 2-31), соединяющего генератор постоянного тока с внешней цепью, ток во внешней цепи должен изменять направление.

На рис. 2-32 показана схема для измерений, а на рис. 2-33 представлена диаграмма, построенная на основании опытных данных.

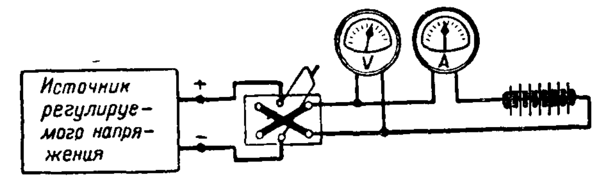


Рис. 2-32. Схема для определения зависимости тока от напряжения в меднозакисном выпрямителе.

Цепь присоединяется к источнику, напряжение которого можно легко регулировать. Перекидной рубильник предназначен для изменения направления тока и напряжения во внешней части цепи.

Обратим внимание на то, что при одном направлении включения генератора напряжению 1 *в* соответствует ток 3,5 *а*, а при другом направлении такому же напряжению (1 *в*) соответствует ток, меньший 0,05 *а*.

В последнем случае ток протекает в противоположном направлении.

Пример. Подсчитайте сопротивление меднозакисного выпрямителя при разных направлениях тока и при напряжении 1 *в*.

Из приведенных цифровых данных находим, что для одного направления (проводящего или, точнее, хорошо проводящего) сопротивление

$$r_1 = \frac{U}{I} = \frac{1\ в}{3{,}5\ а} = 0{,}286\ ом.$$

Для другого направления (непроводящего или, точнее, плохо проводящего) сопротивление больше, чем

$$r_2 = \frac{U}{I} = \frac{1\ в}{0{,}05\ а} = 20\ ом.$$

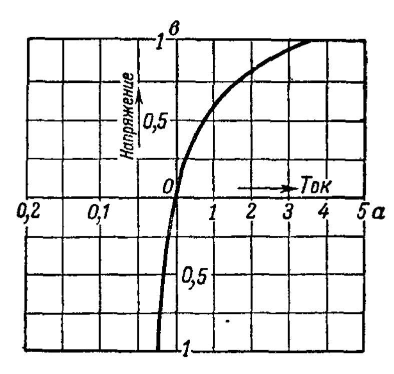


Рис. 2-33. Электрическая характеристика меднозакисного выпрямителя.

По горизонтальной оси вправо отложены значения тока для одного направления (каждое деление соответствует 1 *а*). По той же оси влево отложены значения тока противоположного направления (каждое деление теперь соответствует 0,05 *а*). По вертикальной оси отложено напряжение вверх при одном положении рубильника, вниз — при другом положении. Одно деление в вертикальной оси соответствует 0,25 *в*.

Рассмотренный пример элемента цепи, чувствительного к направлению тока,

лишний раз показывает важность в определении направ ления тока и в правильном определении зажимов + и — источника.

Выпрямляющее действие. Практическое назначение та ких устройств, как рассмотренный меднозакисный элемент, заключается в возможности выпрямления переменного тока: ток, посылаемый генератором в одном направлении, пропускается, а ток, посылаемый в другом направлении, задерживается.

Подобные выпрямители применяются для зарядки аккумуляторов от сети переменного тока и для многих других технических устройств.

2-18. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Пусть две ветви включены параллельно, как это показано на рис. 2-34. Ток в каждой из них можно найти по закону Ома, если известны их сопротивления и напряжение, к которому они приключены. Что же касается общего тока, т. е. тока в неразветвленном участке цепи, то он равен сумме токов.

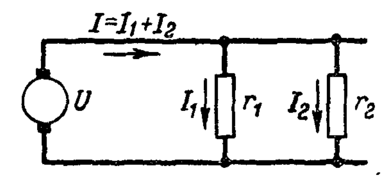


Рис. 2-34. Два параллельно включенных сопротивления.

В неразветвленном участке цепи протекает ток, равный сумме токов в параллельных ветвях

Значит, общий ток можно вычислить так:

$$\text{общий ток} = \frac{\text{напряжение}}{\text{первое сопротивление}} + \frac{\text{напряжение}}{\text{второе сопротивление}}$$

или, пользуясь буквенными обозначениями:

$$I = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2}.$$

Обращаем внимание на то, что напряжение U для обеих ветвей (при параллельном соединении) одинаково.

Подобным же способом можно вычислить общий ток и в том случае, когда имеется не две, а три и большее число параллельных ветвей.

Пример 1. Две параллельные ветви с сопротивлениями $r_1=20$ *ом* и $r_2=50$ *ом* присоединены к напряжению 300 *в*. Найти общий ток (ток в неразветвленном участке цепи).

Решение. Общий ток

$$I=\frac{U}{r_1}+\frac{U}{r_2}=\frac{300\ в}{20\ ом}+\frac{300\ в}{50\ ом}=15\ а+6\ а=21\ а.$$

В тех случаях, когда имеется несколько параллельных ветвей и когда нужно найти общий ток, удобно пользоваться понятием проводимости.

Проводимостью называют величину, обратную сопротивлению:

$$проводимость=\frac{1}{сопротивление}.$$

Проводимость обычно обозначается латинской буквой g:

$$g=\frac{1}{r}.$$

Единицей проводимости служит величина, обратная ому; ее обозначают $1/ом$.

Если сопротивление какого-нибудь участка цепи равно 100 *ом*, то его проводимость равна 0,01 $1/ом$; если сопротивление равно $1/2$ *ом*, то проводимость равна:

$$\frac{1}{1/2\ ом}=2\ \frac{1}{ом}.$$

Из сказанного видно, что вместо деления напряжения на сопротивление можно умножить его на проводимость. Поэтому

ток = напряжение × проводимость.

В случае двух параллельных ветвей мы можем теперь так выразить общий ток:

ток = напряжение × проводимость первой ветви + + напряжение × проводимость второй ветви.

Но тот же результат мы получим, если умножим напряжение (одинаковое для обеих ветвей) на сумму проводимостей:

ток = напряжение × (проводимость первой + проводимость второй ветви).

Все сказанное о двух ветвях относится и к случаю большего числа параллельных ветвей:

общий ток равен приложенному напряжению, умноженному на сумму проводимостей всех параллельных ветвей.

Отсюда мы заключаем, что

общая проводимость ряда параллельных ветвей равна сумме проводимостей этих ветвей.

Замена параллельных ветвей одной с равноценным сопротивлением. Если мы захотим все параллельные ветви заменить одной ветвью с таким сопротивлением, чтобы ток в неразветвленной части цепи не изменился, нам нужно это сопротивление сделать равным единице, деленной на сумму проводимостей всех параллельных ветвей.

Это сопротивление называется сопротивлением, равноценным (общим, эквивалентным) сопротивлению параллельны ветвей.

В случае параллельного соединения

$$\textit{равноценное сопротивление} = \frac{1}{\textit{сумма проводимостей}}.$$

Пример 2. Решим, пользуясь понятием проводимости, задачу, поставленную в предыдущем примере. Две параллельные ветви с сопротивлениями $r_1 = 20$ *ом* и $r_2 = 50$ *ом* присоединены к напряжению 300 *в*. Найти общий ток.

Решение. Вычисляем проводимости:
проводимость первой ветви

$$g_1 = \frac{1}{r_1} = \frac{1}{20\ ом} = 0{,}05\ 1/ом;$$

проводимость второй

$$g_2 = \frac{1}{r_2} = \frac{1}{50\ ом} = 0{,}02\ 1/ом.$$

Общая проводимость (сумма проводимостей)

$$g = g_1 + g_2 = 0{,}05 + 0{,}02 = 0{,}07\ 1/ом.$$

Общий ток равен напряжению, умноженному на сумму проводимостей:

$$I = U(g_1 + g_2) = 300\ в \cdot 0{,}07\ 1/ом = 21\ а.$$

Как и следовало ожидать, мы получили прежний ответ.

Пример 3. К напряжению 240 *в* параллельно включены две ветви с сопротивлениями $r_1 = 60$ *ом* и $r_2 = 40$ *ом*.

Найти равноценное им сопротивление и вычислить общий ток.

Решение. Находим сумму проводимостей, приводя слагаемые к общему знаменателю

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{60} + \frac{1}{40} = \frac{40 + 60}{60 \cdot 40} = \frac{100}{2\,400}\ 1/ом.$$

$$\textit{Равноценное сопротивление}\ r = \frac{1}{\textit{сумма проводимостей}}.$$

Значит, равноценное сопротивление

$$r = \frac{1}{\frac{100}{2\,400}} = \frac{2\,400}{100} = 24 \text{ ом}.$$

Общий ток равен напряжению, деленному на равноценное сопротивление:

$$I = \frac{U}{r} = \frac{240 \text{ в}}{24 \text{ ом}} = 10 \text{ а}.$$

Ответ нами найден. Проверим его следующим образом: ток в первой ветви

$$I_1 = \frac{U}{r_1} = \frac{240 \text{ в}}{60 \text{ ом}} = 4 \text{ а};$$

ток во второй ветви

$$I_2 = \frac{240 \text{ в}}{40 \text{ ом}} = 6 \text{ а}.$$

Их сумма действительно равна найденному выше общему току

$$I = 10 \text{ а} = I_1 + I_2 = 4 \text{ а} + 6 \text{ а}.$$

Общее (равноценное) сопротивление ряда параллельных ветвей всегда должно быть меньше сопротивления каждой из этих ветвей. Действительно, ведь подключая новую ветвь, мы создаем новый путь току, мы увеличиваем проводимость, а сопротивление и проводимость — это величины взаимно обратные.

Отметим два важных частных случая. Если параллельно соединены несколько ветвей с одинаковыми сопротивлениями, то эквивалентное сопротивление такой цепи можно найти, разделив сопротивление одной ветви на число ветвей. Так, например, при параллельном соединении восьми ламп по 100 *ом* сопротивление, равноценное восьми лампам, равно:

$$\frac{100}{8} = 12{,}5 \text{ ом}.$$

Общее сопротивление двух параллельных ветвей. Если параллельно соединены две (но не больше) ветви с различными сопротивлениями, то равноценное им сопротивление (общее сопротивление) равно произведению этих двух сопротивлений, деленному на их сумму:

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Пользуясь этой формулой, мы могли бы сразу определить величину равноценного сопротивления в примере 3:

$$r = \frac{40 \cdot 60}{40 + 60} = 24 \text{ ом.}$$

2-19. ТОК В СЛОЖНЫХ ЦЕПЯХ

Рассмотрим распределение токов в более сложных цепях. Пусть, например, требуется найти токи во всех частях цепи, представленной на рис. 2-35. Эта цепь содержит как последовательное, так и параллельное включение сопротивлений.

К решению задачи можно подойти так: по правилу, выведенному выше, заменим параллельные ветви одним равноценным сопротивлением. Затем сложим это сопротивление с сопротивлением неразветвленного участка цепи, т. е. с последовательно включенным сопротивлением.

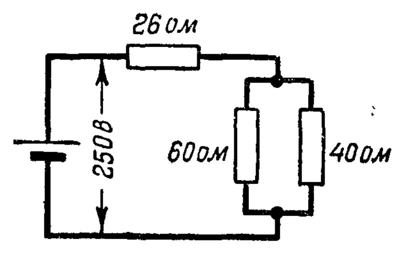


Рис. 2-35. Смешанное соединение сопротивлений.

Разделив напряжение на общее сопротивление, мы найдем ток в неразветвленной части цепи. Умножив этот ток на сопротивление, равноценное сопротивлению параллельных ветвей, мы найдем ту часть напряжения, которая будет приложена к точкам разветвления. Деля это напряжение по очереди на сопротивление каждой из параллельных ветвей, мы найдем протекающие по ним токи.

Пример. Пусть генератор имеет напряжение 250 *в*, и его цепь состоит из последовательно включенного сопротивления $r_0 = 26$ *ом*, вслед за которым включены параллельные между собой сопротивления в 60 и 40 *ом*, как это показано на рис. 2-35.

Решение. Сопротивление, равноценное двум параллельным ветвям:

$$r_{12} = \frac{40 \cdot 60}{40 + 60} \text{ ом} = 24 \text{ ом.}$$

Сложив это сопротивление с последовательно включенным сопротивлением в 26 *ом*, получим общее сопротивление цепи, соединенной с генератором:

$$r = 26 \text{ ом} + 24 \text{ ом} = 50 \text{ ом.}$$

Деля напряжение генератора на это общее сопротивление, найдем ток в неразветвленной части цепи

$$I_{\text{общ}} = \frac{U}{r} = \frac{250\ \textit{в}}{50\ \textit{ом}} = 5\ \textit{а}.$$

Произведение тока на равноценное сопротивление двух параллельных ветвей равно

$$I \cdot r_{12} = 5\textit{а} \cdot 24\ \textit{ом} = 120\ \textit{в}.$$

Это и есть напряжение на параллельных ветвях. Ток в первой из них ($r_1 = 60$ *ом*)

$$I_1 = \frac{120\ \textit{в}}{60\ \textit{ом}} = 2\ \textit{а}.$$

Ток во второй ($r_2 = 40$ *ом*)

$$I_2 = \frac{120\ \textit{в}}{40\ \textit{ом}} = 3\ \textit{а}.$$

Нас может убедить в правильности полученного решения, во-первых, то, что сумма токов в параллельных ветвях оказалась действительно равной общему току, а также то, что напряжение, оставшееся от 250 *в*, даваемых генератором, после того как мы из него вычтем 120 *в*, потраченных на прохождение тока по параллельным ветвям, равно

$$250\ \textit{в} - 120\ \textit{в} = 130\ \textit{в}.$$

А 130 *в* — этот как раз то напряжение, которое должно быть приложено к сопротивлению в 26 *ом* для того, чтобы вызвать в нем ток в 5 *а*. Действительно, 26 *ом* · 5 *а* = 130 *в*.

Другой способ решения. Ту же самую задачу можно решить и другим способом. Предположим, что по сопротивлению $r_1 = 60$ *ом* проходит ток $I_1 = 1$ *а*. В этом случае напряжение на концах первого сопротивления равнялось бы 60 *в* Но это же напряжение приложено к сопротивлению $r_2 = 40$ *ом*, и, следовательно, ток в этом сопротивлении равнялся бы $\frac{60\ \textit{в}}{40\ \textit{ом}} = 1{,}5$ *а*.

В неразветвленном участке цепи (по сопротивлению 26 *ом*) проходил бы ток, равный $1 + 1{,}5 = 2{,}5$ *а*, и напряжение на этом сопротивлении равнялось бы 26 *ом* · 2,5 *а* = 65 *в*. Напряжение на концах цепи, т. е на зажимах генератора, равнялось бы $60 + 65 = 125$ *в*. В действительности же оно равняется 250 *в*, т. е. вдвое больше найденной нами величины. Отсюда следует, что все найденные нами значения токов и напряжений надо увеличить вдвое, что приведет нас к результатам, найденным ранее другим способом.

Не следует, однако, думать, что ветви в электрических цепях могут соединяться между собой лишь последовательно или параллельно. Существуют и более сложные способы соединения.

2-20. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА И ПОТЕРЯ НАПРЯЖЕНИЯ

До сих пор, рассматривая генераторы, мы считали, что величина напряжения на их зажимах не зависит от величины протекающего по ним тока. Это возможно только при условии дополнительного регулирования работы генератора. В самом деле, проводниковая цепь и внутри генератора обладает сопротивлением, следовательно, часть того общего напряжения, которое создается в генераторе, тратится на преодоление сопротивления самого генератора, если только через генератор протекает ток.

Напряжение, теряемое в генераторе (потеря напряжения), равно произведению внутреннего сопротивления генератора и протекающего тока.

Напряжение, которое давал бы генератор, если бы в его сопротивлении не терялась часть напряжения, называют его электродвижущей силой (э. д. с.). Когда генератор нагружен током, напряжение на его зажимах меньше развиваемой им э. д. с. как раз на величину напряжения, теряемого в обмотке. Таким образом,

напряжение на зажимах = э. д. с. — потеря напряжения.

Когда ток равен нулю, т. е. когда генератор не нагружен, напряжение на его зажимах равно его э. д. с.

Потеря напряжения имеет место не только внутри генератора, но и в проводах, соединяющих генератор с потребителем. Она равна произведению тока и сопротивления проводов. При расчете проводов их сечение выбирают так, чтобы потеря напряжения в проводах была невелика.

Пример 1. Внутреннее сопротивление генератора составляет $r = 0{,}1$ *ом*, его э. д. с. $Э = 120$ *в*. Чему равно напряжение на его зажимах U, если генератор нагружен током $I = 150$ *а*?

Решение. Вычисляем потерю напряжения в генераторе:

$$I \cdot r = 150\ а \cdot 0{,}1\ ом = 15\ в.$$

Напряжение на его зажимах

$$U = Э - I \cdot r = 120 - 15 = 105\ в.$$

Пример 2. Потребитель электроэнергии присоединен посредством проводов к генератору (рис. 2-36).

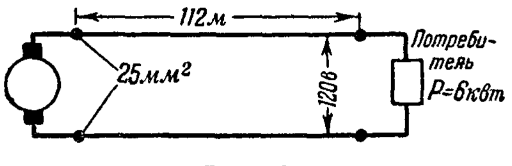


Рис. 2-36

Напряжение у потребителя $U = 120$ *в*. Потребляемая мощность $P = 6$ *квт* (6 000 *вт*). Длина проводов (в один конец) 112 *м*. Сечение провода $S = 25$ *мм*². Провода — медные; их удельное сопротивление $\rho = \frac{1}{56}$ *ом* на 1 *м* при сечении в 1 *мм*². Требуется найти напряжение на зажимах источника (генератора).

Решение. Зная мощность и напряжение потребителя, находим ток, текущий по проводам

$$I = \frac{P}{U} = \frac{6\,000 \text{ вт}}{120 \text{ в}} = 50 \text{ а}.$$

Вычисляем сопротивление проводов r, общая длина которых (прямой и обратный путь тока) составляет

$$l = 2 \cdot 112 \text{ м} = 224 \text{ м}.$$

Находим

$$r = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{56} \cdot \frac{224}{25} = 0{,}16 \text{ ом}.$$

Умножая ток на сопротивление проводов, вычисляем потерю напряжения:

$$I \cdot r = 50 \text{ а} \cdot 0{,}16 \text{ ом} = 8 \text{ в}.$$

Напряжение на зажимах генератора равно:

$$120 \text{ в} + 8 \text{ в} = 128 \text{ в}.$$

Пример 3. Чему равна э. д. с., развиваемая генератором предыдущего примера, если его внутреннее сопротивление $r_0 = 0{,}06$ *ом*?

Решение. Вычисляем потерю напряжения в генераторе при токе 50 *а*:

$$I \cdot r_0 = 50 \text{ а} \cdot 0{,}06 \text{ ом} = 3 \text{ в}.$$

Электродвижущая сила генератора

$$Э = U + I \cdot r + I \cdot r_0 = 120 \text{ в} + 8 \text{в} + 3 \text{ в} = 131 \text{ в}.$$

2-21. ПОТЕРЯ МОЩНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Вместе с потерей напряжения в проводах и внутри генератора происходит и потеря мощности.

Из выражения для мощности легко определить, что

потеря мощности = ток × потеря напряжения[1].

Потеря мощности может быть вычислена также по закону Ленца—Джоуля, так как эта бесполезно затрачиваемая («теряемая») мощность идет на нагревание проводов.

[1] При переменном токе этим выражением не всегда можно пользоваться.

Зная потерю мощности и мощность, полезно переданную, нетрудно вычислить **коэффициент полезного действия** (к. п. д.):

$$\text{к. п. д.} = \frac{\text{полезная мощность}}{\text{полезная мощность} + \text{потерянная}}.$$

Чтобы выразить к. п. д. в процентах, полученный результат нужно еще умножить на 100.

Пример 1. Вычислить к. п. д. генератора в примере 1 предыдущего параграфа.

Решение. Напряжение на зажимах генератора $U = 105$ *в*, потеря напряжения 15 *в*, ток $I = 150$ *а*.

Следовательно,

$$\text{отдаваемая мощность} = 105\ в \cdot 150\ а = 15\,750\ вт;$$

$$\text{теряемая мощность} = 15\ в \cdot 150\ а = 2\,250\ вт;$$

$$\text{к. п. д.} = \frac{15\,750}{15\,750 + 2\,250} = 0{,}875$$

или, умножая на 100, *к. п. д.* = 87,5%.

Пример 2. Вычислить к. п. д. линии передачи, рассмотренной в примере 2 предыдущего параграфа.

Решение.

$$\text{потребляемая мощность} = 120\ в \cdot 50\ а = 6\,000\ вт;$$

$$\text{теряемая мощность} = 8\ в \cdot 50\ а = 400\ вт,$$

$$\text{к. п. д.} = \frac{6\,000}{6\,000 + 400} = 0{,}938,\ \text{или}\ 93{,}8\%.$$

Пример 3. Вычислим к. п. д. линии, по которой энергия передается при высоком напряжении.

Длина линии $l = 100$ *км*; провода линии — медные сечением $S = 150$ *мм*²; напряжение у потребителя $U = 200\,000$ *в* или 200 *кв* (киловольт, т. е. тысяч вольт)· передаваемая мощность $P = 80\,000$ *квт*.

Решение. Прежде всего вычисляем сопротивление линии

$$r = \rho\frac{2l}{S} = 0{,}0178\frac{200\,000\ м}{150\ мм^2} = 23{,}8\ ом.$$

Заметим, что оно очень велико — ведь линия очень длинная Затем вычисляем ток

$$I = \frac{P}{U} = \frac{80\,000\,000\ вт}{200\,000\ в} = 400\ а.$$

Потерю мощности в проводах можно вычислить по закону Ленца — Джоуля.

$$p = I^2 \cdot r = 400\ а \cdot 400\ а \cdot 23{,}8\ ом = 3\,800\ квт.$$

Как видно из приведенного расчета, потеря мощности очень велика. этой мощности хватило бы для питания 50 000 лампочек мощностью примерно по 75 *вт* каждая.

Однако по сравнению с огромной передаваемой мощностью (80 000 *квт*) потеря мощности не так велика.

В самом деле, к. п. д. линии передачи:

$$\text{к. п. д.} = \frac{P}{P + p} = \frac{80\,000 \text{ квт}}{80\,000 \text{ квт} + 3\,800 \text{ квт}} = 0,955,$$

или 95,5%.

Линия передачи электроэнергии. В дореволюционной России была лишь одна линия длиной до 100 *км*. Электрическая энергия передавалась по ней при напряжении 60 *кв*.

В настоящее время Москва получает энергию, вырабатываемую Волжской гидроэлектростанцией имени В. И. Ленина. Эта энергия передается при напряжении 400 *кв* и проходит путь около 1 000 *км*.

Первая линия электрической передачи энергии была осуществлена в России инж. Ф. А. Пироцким в 1875 г. Ее длина была всего лишь 1 *км*, а передававшаяся мощность была около 5 *квт*. Но это была первая в мире линия электрической передачи энергии.

За границей первая линия передачи (Германия) появилась только через 7 лет. Она была построена французским инженером Депре.

2-22. ЦЕПЬ С ДВУМЯ ГЕНЕРАТОРАМИ

До сих пор во всех рассмотренных примерах мы имели дело с цепью, внутри которой включен только один генератор. Рассмотрим теперь пример цепи, в которой сразу включено два генератора.

Два генератора включены так, как показано на рис. 2-37. Электродвижущая сила первого генератора $Э_1 = 120$ *в*, э. д. с. второго $Э_2 = 115$ *в*.

Сопротивления, обозначенные на рисунке буквами r_1 и r_2, представляют собой внутренние сопротивления первого и второго генераторов. Пусть эти сопротивления равны каждое 1 *ом*.

Кроме того, между зажимами генераторов включено сопротивление, равное 3 *ом*.

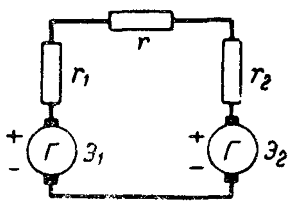


Рис. 2-37. Цепь из двух генераторов и сопротивления r. Электродвижущие силы генераторов направлены навстречу. Через r_1 и r_2 обозначены внутренние сопротивления генераторов.

Спрашивается: 1) чему равен ток в расматриваемой цепи; 2) чему равны напряжения на зажимах первого и второго генераторов?

Прежде всего необходимо обратить внимание на то, в какой последовательности соединены генераторы. Иначе говоря, в каком направлении стремится посылать ток первый генератор и в каком направлении стремится посылать ток второй генератор.

Встречное включение. Знаки + и —, поставленные около генераторов, показывают нам, что первый генератор стремится посылать ток так, чтобы он протекал по ходу часовой стрелки. Напротив, второй генератор стремится посылать ток в направлении, прямо противоположном.

Электродвижущие силы генераторов (рис. 2-37) направлены навстречу друг другу.

Если бы э. д. с. генераторов при их встречном включении были одинаковы, ток в цепи вовсе бы не мог протекать. Но в нашем примере э. д. с. первого генератора больше, и в цепи ток идет в том направлении, в каком его посылает первый генератор. Чему же равен этот ток?

Электродвижущая сила первого генератора должна теперь расходоваться не только на преодоление сопротивления проводов, но и на уравновешивание встречной э. д. с., развиваемой вторым генератором. В итоге в цепи будет протекать ток, равный по величине току, который мог бы создаваться э. д. с., равной разности э. д. с. первого и второго генераторов.

Эта разность равна:

$$Э_1 - Э_2 = 120\ в - 115\ в = 5\ в.$$

Общее сопротивление всех последовательно включенных участков цепи равно:

$$r_1 + r + r_2 = 1\ ом + 3\ ом + 1\ ом = 5\ ом.$$

Следовательно, ток равен:

$$I = \frac{5\ в}{5\ ом} = 1\ а.$$

Теперь ответим на второй вопрос: чему равно напряжение на зажимах первого генератора?

Очевидно, оно равно э. д. с. этого генератора ($Э_1 = 120\ в$) за вычетом того напряжения, которое теряется в сопротивлении этого генератора, т. е. за вычетом 1 *в* (ток

равен 1 *а* и сопротивление $r_1=1$ *ом*). Иначе говоря, напряжение на зажимах первого генератора равно 119 *в*.

Напряжение на зажимах второго генератора будет меньше еще на величину напряжения, приходящегося на сопротивление, включенное между генераторами.

Это напряжение равно 3 *в* (ток $I=1$ *а*, сопротивление $R=3$ *ом*). Следовательно, напряжение на зажимах второго генератора равно:

$$119\ в - 3\ в = 116\ в.$$

Это напряжение оказывается больше э. д. с. второго генератора. Правильно ли мы выполнили решение?

Да, правильно: ведь источником энергии является только первый генератор, ток во втором генераторе течет в направлении, противоположном тому току, который посылал бы этот второй генератор, если бы он работал отдельно от первого.

Второй генератор является теперь потребителем (а не производителем) электрической энергии, но таким потребителем, который обладает э. д. с. Из 116 *в*, подведенных к зажимам второго генератора, 115 *в* расходуется на преодоление его э. д. с. и 1 *в* — на потерю напряжения в его обмотке.

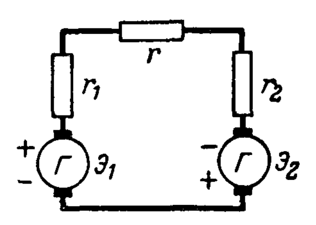


Рис. 2-38. Цепь из двух генераторов и сопротивления *r*.

Через r_1 и r_2 обозначены внутренние сопротивления генераторов Электродвижущие силы генераторов направлены согласно (в одну сторону)

Согласное включение. Рассмотрим другой случай: два генератора включены согласно, т. е. так, что они оба стремятся посылать ток в одном направлении (рис. 2-38). Теперь картина получается иной: оба генератора стремятся посылать ток в одном и том же направлении (по часовой стрелке), и действие их э. д. с. складывается. В итоге в цепи должен протекать ток, равный сумме э. д. с. двух генераторов, деленной на общее сопротивление цепи.

Пусть э. д. с. генераторов и сопротивления цепи имеют прежние значения:

$$Э_1 = 120\ в,\ Э_2 = 115\ в;$$

$$r_1 + r + r_2 = 1\ ом + 3\ ом + 1\ ом = 5\ ом.$$

В таком случае ток

$$I = \frac{Э_1 + Э_2}{r_1 + r + r_2} = \frac{235\ в}{5\ ом} = 47\ а.$$

2-23. ТРЕХПРОВОДНАЯ ЛИНИЯ

Рассмотрим электрическую цепь, схематически представленную на рис. 2-39.

Два разных потребителя с сопротивлениями r_1 и r_2 питаются по трехпроводной линии от двух одинаковых генераторов. Внутренние сопротивления каждого из генераторов $r_г = 0{,}25$ *ом*; э. д. с. генераторов $Э_1$ и соответственно $Э_2$.

Обратите внимание, как соединены генераторы — к общему узлу подсоединен положительный зажим (+) одного генератора и отрицательный (—) — другого.

Сопротивления каждого из крайних одинаковых проводов $r = 0{,}75$ *ом*.

Сопротивление среднего провода $r_0 = 1{,}25$ *ом* (значит, средний провод имеет меньшее сечение, чем крайние провода).

Измерительные приборы, установленные у потребителей показывают, что у первого потребителя

напряжение $U_1 = 160$ *в*, ток $I_1 = 40$ *а*,

а у второго потребителя

напряжение $U_2 = 216$ *в*, ток $I_2 = 24$ *а*.

Стрелки на схеме рис. 2-39 показывают направления токов. Покажем, как на основании приведенных данных можно определить напряжения на всех участках цепи и э. д. с. генераторов.

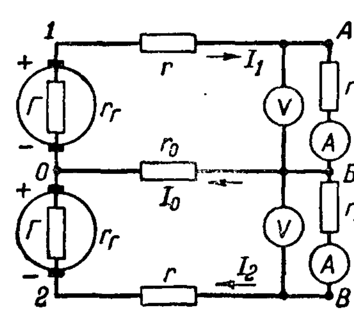


Рис. 2-39. Два генератора питают потребителей r_1 и r_2 по трехпроводной линии.

r — сопротивление каждого из крайних проводов линии; $r_г$ — внутреннее сопротивление каждого из двух генераторов.

Буквами I_1, I_2, I_0 обозначены токи в трех проводах

Стрелки показывают направления токов.

Мы уже знаем, как определить напряжение, приходящееся на отдельные участки цепи. Так, рассматривая верхний провод, легко определяем теряемое в нем напряжение

$$I_1 \cdot r = 40 а \cdot 0{,}75\ ом = 30\ в.$$

По-прежнему найдем и потерю напряжения в первом (верхнем) генераторе, умножая его внутреннее сопротивление на ток:

$$r_г \cdot I_1 = 40 а \cdot 0{,}25\ ом = 10\ в.$$

Но для того чтобы найти э. д. с. первого генератора, нужно еще учесть напряжение

приходящееся на средний провод, соединяющий общую точку двух генераторов с общей точкой двух потребителей (узел *Б*).

Разветвление токов в узле *Б*. Для этого прежде всего нужно знать

какой ток протекает в среднем проводе?

К узлу *Б* через r_1 притекает ток $I_1=40$ *а*, а утекает через r_2 ток $I_2=24$ *а*.

Остаток первого тока уходит от узла *Б* по среднему проводу.

Значит,

$$I_0 = I_1 - I_2 = 40\ a - 24\ a = 16\ a.$$

К узлу *Б* приходит ток $I_1=40\ a$ и уходит ток

$$I_2 + I_0 = 24\ a + 16\ a = 40\ a.$$

Найдя ток I_0 и зная сопротивление провода $r_0 = 1{,}25$ *ом*, находим теряемое в нем напряжение

$$I_0 \cdot r_0 = 16\ a \cdot 1{,}25\ ом = 20\ в.$$

Определение э. д. с. первого генератора. Вот теперь, обходя по замкнутому пути *01АБ0*, содержащему:

1) первый генератор с его э. д. с. $Э_1$;

2) последовательно соединенные сопротивления $r_г$, r и r_1 с током I_1;

3) средний провод с сопротивлением r_0 и со своим особым током I_0, найдем э. д. с., как сумму напряжений на всех участках нашего пути:

$$Э_1 = I_1(r_г + r + r_1) + I_0 \cdot r_0 = 40\ a\,(0{,}25\ ом + 0{,}75\ ом +$$

$$+ 4\ ом) + 16\ a \cdot 1{,}25\ ом = 40\ a \cdot 5\ ом + 16\ a \cdot 1{,}25\ ом =$$

$$= 200\ в + 20\ в = 220\ в$$

(сопротивление $r_1 = 4$ *ом* мы нашли, зная U_1 и I_1).

Определение э. д. с. второго генератора. Теперь нужно выбрать другой замкнутый путь, состоящий из отдельных участков цепи, и выбрать его так, чтобы в него обязательно входил второй генератор.

В качестве такого пути выберем *20БВ2*; он содержит теперь:

1) второй генератор с его э. д. с. $Э_2$;

2) последовательно соединенные сопротивления r_2, r и $r_г$; они все имеют один ток I_2;

3) средний провод со своим током и сопротивлением. Но теперь ток I_0 идет навстречу току, который стремится посылать второй генератор. Поэтому напряжение, теряемое в среднем проводе, приходится вычитать из суммы напряжений на остальных участках цепи:

$$Э_2 = I_2(r_г + r + r_2) - I_0 \cdot r_0 = 24 а (0{,}25\ ом + 0{,}75\ ом + 9\ ом) - 16\ а \cdot 1{,}25\ ом = 24\ а \cdot 10\ ом - 20\ в = 240\ в - 20\ в = 220\ в$$

(сопротивление $r_2 = 9\ ом$ определено по току I_2 и напряжению U_2).

Почему нужно было вычитать $I_0 \cdot r_0$? Мы разберем этот вопрос подробнее в следующем параграфе. Но кое-что можно сказать сразу.

Во-первых, обратите внимание на то, что напряжение $I_0 \cdot r_0$ мы уже отнесли на счет э. д. с. первого источника (при обходе по пути *01АБ0*). Для этого у нас было такое основание: ток в этом участке протекает именно в том направлении, в каком его стремится посылать первый генератор.

Но если первый генератор «взял на свой счет» средний провод, значит он вообше сильнее работает.

Превосходство условий первого генератора перед вторым объяснить нетрудно: хотя у них э. д. с. одинаковы, но последовательно с первым генератором включено сопротивление нагрузки всего 4 *ом*, а последовательно со вторым 9 *ом*.

Но если первый генератор взял на себя напряжение среднего провода, то это значит, что он принял участие в преодолении других сопротивлений, включенных последовательно со вторым генератором.

Рассуждения, приведенные здесь, конечно, не вполне строги.

Зато можно проверить со всей строгостью правильность проведенного расчета.

Обойдем для этого по новому замкнутому пути *01АБВ20*, содержащему:

1) э. д. с. и первого и второго генераторов;

2) последовательно соединенные сопротивления $r_г$, r и r_1 с током I_1;

3) последовательно соединенные сопротивления r_2, r и $r_г$ с другим током I_2.

Сумма э. д. с. оказывается равной сумме напряжений на отдельных участках замкнутого пути.

Действительно [1],

$$Э_1 + Э_2 = 220\ в + 220\ в = I_1(r_г + r + r_1) +$$
$$+ I_2 \cdot (r_2 + r + r_г) = 40\ а \cdot 5\ ом + 24\ а \cdot 10\ ом = 440\ в.$$

Преимущества трехпроводной линии. Одно из существенных преимуществ трехпроводной линии состоит в том, что в среднем проводе протекает разность токов крайних проводов. А при меньшем токе происходят и меньшие потери энергии в линии.

Трехпроводная линия представляет собой как бы две линии из трех проводов вместо четырех, да еще с менее загруженным третьим проводом.

Если бы нагрузки были одинаковы, в среднем проводе тока не было бы вовсе.

Естественно поставить вопрос, нельзя ли в таком случае обойтись вовсе без среднего провода? Какую пользу приносит провод, по которому не протекает ток?

Для того чтобы уяснить себе роль среднего провода, предположим, что произошел обрыв одного из крайних проводов, например верхнего. Если бы не было среднего провода, то в этом случае оба потребителя оказались бы выключенными. При наличии же среднего провода выключится только потребитель r_1, а потребитель r_2 будет получать энергию от второго генератора. Также и при неравенстве нагрузок у обоих потребителей средний провод выравнивает распределение напряжения между ними. Но так как при нормальной работе ток в среднем проводе невелик, то его сечение берется меньшим, чем у крайних проводов.

2-24. ЗАЗЕМЛЕНИЕ И ПОТЕНЦИАЛ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ В ТРЕХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

Обратимся к примеру только что рассмотренной трехпроводной цепи (рис. 2-39), распределение токов в которой нами уже найдено.

[1] Заметим еще, что, вычитая из последнего уравнения уравнение, составленное для пути *01АБ0*, мы получаем как раз уравнение, составленное нами для пути *2ОБВ2*.

Спросим себя, нарушится ли это распределение, если мы заземлим какую-нибудь одну точку нашей цепи, например точку *0*?

Чтобы дать правильный ответ на этот вопрос, надо помнить, что электрический ток может протекать лишь в замкнутой цепи. Заземление одной точки цепи, т. е. присоединение ее к проложенным в земле трубам или

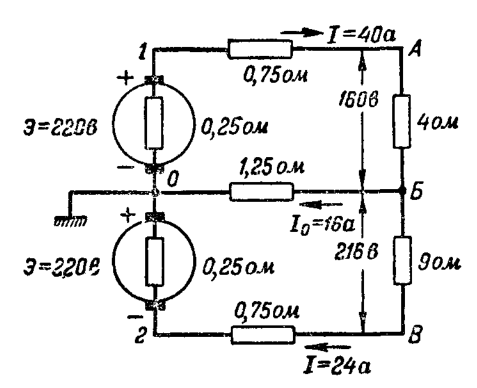


Рис. 2-40. К вычислению потенциалов в трехпроводной системе.

Слева условным знаком показано соединение с землей точки *0* На схеме указаны все значения сопротивлений, токов и э. д. с., данных и вычисленных в § 2-23.

к забитым в землю железным стержням, не создает нового замкнутого пути для тока.

При соединении с землей одной точки цепи ток в землю ответвляться не будет, если вся остальная часть цепи имеет достаточно хорошую изоляцию.

Другое дело, если заземляются одновременно две точки электрической цепи: в этом случае ток может ответвиться в землю через одну из заземляющих точек и, пройдя по земле, вернуться через другую заземляющую точку.

Потенциал.

Напряжение между какой-нибудь точкой электрической цепи и землей называют потенциалом этой точки.

Очевидно, что потенциал заземленной точки равен нулю.

Соединим с землей точку *0* нашей трехпроводной системы (рис. 2-40) и определим потенциалы других точек, обозначенных на схеме цифрами *1*, *2* и буквами *А*, *Б*, *В*.

Напряжение первого генератора равно разности между его э. д. с. и потерей напряжения в нем:

$$U_{1г} = Э_1 - I_1 \cdot r_г = 220\ в - 40\ а \cdot 0{,}25\ ом = 210\ в.$$

Значит, потенциал точки *1*, т. е. напряжение точки *1* относительно земли,

$$П_1 = U_{1г} = 210\ в.$$

Потенциал точки *А* меньше на величину потери напряжения в верхнем проводе

$$П_А = П_1 - I_1 \cdot r = 210\ в - 40\ а \cdot 0{,}75\ ом = 180\ в.$$

Потенциал точки *Б* уменьшается еще на величину потери напряжения в сопротивлении нагрузки

$$П_Б = П_А - I_1 \cdot r_1 = 180\ в - 160\ в = 20\ в.$$

Если мы теперь вернемся в точку *0*, мы должны попрежнему полагать, что потенциал в ней должен быть меньше, чем в точке *Б*, как раз на величину напряжения, приходящегося на средний провод:

$$П_0 = П_Б - I_0 \cdot r_0 = 20\ в - 16\ а \cdot 1{,}25\ ом = 0.$$

Потенциал точки *0* равен нулю.

Как раз из этого положения мы исходили при нашем расчете.

Ответ $П_0 = 0$ подтверждает правильность наших выкладок.

Из приведенных расчетов мы можем сделать такой вывод:

потенциал точек цепи понижается, если мы идем в направлении тока.

Иными словами, на участках цепи, не содержащих источников э. д. с.,

ток направлен от точек более высокого потенциала к точкам более низкого потенциала.

При этом на каждом участке потенциал понижается на величину напряжения этого участка.

Другое важное заключение:

разность потенциалов двух точек равна напряжению между этими точками.

Усвоив эти правила, перейдем к определению потенциалов точек B и 2.

Потенциал точки B ниже, чем потенциал точки $Б$, на величину напряжения, приходящегося на сопротивление r_2, т. е.

$$П_B = П_Б - I_2 \cdot r_2 = 20\ в - 24\ а \cdot 9\ ом =$$
$$= 20\ в - 216\ в = -196\ в.$$

Потенциал точки B оказался отрицательным (ниже нуля).

Еще более низким потенциалом обладает точка 2 — отрицательный зажим второго генератора:

$$П_2 = П_B - I_2 \cdot r = -196\ в - 24\ а \cdot 0{,}75\ ом = -214\ в.$$

Найденное значение потенциала должно равняться напряжению второго генератора, которое мы научились определять как разность э. д. с. и потери напряжения во внутреннем сопротивлении:

$$Э - I_2 \cdot r = 220\ в - 24\ а \cdot 0{,}25\ ом = 220\ в - 6\ в = 214\ в.$$

Мы только что получили то же число, но только со знаком минус. Это находит свое объяснение: с землей соединен положительный зажим генератора, а точка 2—отрицательный зажим.

Изменение потенциалов по пути *20БВ2*. При переходе от точки 2 к точке 0 потенциал повышается на величину э. д. с. генератора и понижается на величину потери напряжения во внутреннем сопротивлении генератора

$$Э - I_2 \cdot r = 214\ в.$$

Настолько потенциал точки 0 выше потенциала точки 2, насколько нуль выше, чем минус 214 *в*.

При переходе от точки 0 к точке $Б$ мы наблюдаем повышение потенциала на величину напряжения, приходящегося на средний провод:

$$I_0 r_0 = 20\ в.$$

Именно повышение, так как при переходе от 0 к $Б$ мы идем навстречу току.

При переходе от $Б$ к B и от B к 2 потенциал понижается, так как мы идем в направлении тока. Это понижение потенциала равно:

$$I_2 \cdot R_2 + I_2 \cdot r = 216\ в + 18\ в = 234\ в.$$

Естественно, что два подъема потенциала

$$(214\ в + 20\ в = 234\ в)$$

и два спуска потенциала (234 *в*) равны друг другу, поскольку, выйдя из точки 2, мы вернулись в ту же самую точку 2.

Какую цель преследуют, заземляя одну из точек цепи? На практике к заземлению какой-нибудь точки цепи прибегают с целью уменьшить опасность поражения электрическим током.

При нечаянном прикосновении к какой-нибудь точке электрической установки тело человека окажется под напряжением, равным потенциалу точки соприкосновения.

Рассмотрев трехпроводную линию при заземлении средней точки двух генераторов, мы нашли, что наибольшая разность потенциалов между землей и проводами линии достигает 214 *в* (нижний провод) и 210 *в* (верхний провод).

Если бы мы не заземляли средней точки, то при случайном заземлении одной из точек цепи, например точки 2, потенциал других участков оказался бы очень высоким: в точке 1 потенциал достиг бы 424 *в*. Такое напряжение относительно земли недопустимо высоко с точки зрения безопасности, и должны быть приняты меры предосторожности, обязательные для установок высокого напряжения.

2-25. ПРАВИЛА КИРХГОФА

Решение задач, подобных приведенным выше и еще более сложных, требует определенного навыка. Но все задачи на распределение токов в сложных цепях, сколько бы в таких цепях ни было генераторов и разнообразных ответвлений, могут быть решены на основании первого и второго правил (законов) Кирхгофа, если только известны все сопротивления и все э. д. с.

Эти правила, которыми мы пользовались, не говоря о них, заключаются в следующем.

Первое правило Кирхгофа:

Сумма всех токов, притекающих к любой точке цепи, равна сумме всех токов, утекающих от этой точки.

Второе правило Кирхгофа:

Если обходить цепь тока и вновь вернуться в прежнюю точку, то какой бы путь обхода мы

ни выбрали, сумма всех встреченных на пути э. д. с. должна быть равна сумме всех напряжений, теряемых на отдельных участках (т. е. сумме всех произведений $I \cdot r$).

При этом, однако, речь идет об **алгебраических** суммах, т. е. о суммах, в которых отдельные слагающие могут оказаться отрицательными величинами. Отрицательные величины при этом, разумеется, должны вычитаться.

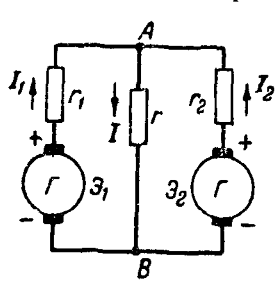


Рис. 2-41. Параллельная работа двух генераторов.

Электродвижущие силы, стремящиеся посылать ток в направлении нашего обхода, должны входить в сумму со знаком плюс, напротив, э. д. с., стремящиеся посылать ток в направлении, противоположном нашему обходу, должны входить в сумму со знаком минус.

Точно так же произведения тока и сопротивления должны входить в нашу сумму со знаком плюс, если ток на соответствующем участке совпадает с направлением нашего обхода, и, напротив, — со знаком минус, если ток на соответствующем участке направлен навстречу принятому обходу [1].

В заключение рассмотрим пример сложной цепи и покажем на этом примере, как нужно применять правила Кирхгофа.

Два генератора с э. д. с. $Э_1 = 108$ *в* и $Э_2 = 102$ *в* и с внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 по 0,1 *ом* питают общего потребителя, имеющего сопротивление в 1 *ом*. Схема этой цепи приведена на рис. 2-41. Как в этом случае распределятся токи в ветвях цепи?

Пользуясь первым правилом Кирхгофа, составляем такое равенство:

$$I_1 + I_2 = I,$$

так как к узловой точке *A* притекают токи I_1 и I_2 и утекает ток I.

Пользуясь вторым правилом Кирхгофа, мы можем написать еще два равенства, обходя, например, нашу цепь один

[1] Направление обхода при этом может быть выбрано совершенно произвольно: изменение направления обхода вызовет изменение всех знаков в наших суммах. Справедливость равенства, написанного в соответствии со вторым правилом Кирхгофа, не изменится.

раз по внешнему пути (контуру), составленному из двух генераторов, а другой раз по внутреннему пути (контуру), образованному первым генератором и потребителем. Если при этом мы будем обходить оба контура по часовой стрелке, мы придем к таким равенствам:

для внешнего контура

$$Э_1 - Э_2 = I_1 \cdot r_1 - I_2 \cdot r_2;$$

для внутреннего контура

$$Э_1 = I_1 \cdot r_1 + I \cdot r.$$

Подставив в эти уравнения известные нам числовые значения, получим:

$$I_1 + I_2 = I;$$

$$6 = 0,1\, I_1 - 0,1\, I_2;$$

$$108 = 0,1\, I_1 + 1 \cdot I,$$

т. е. систему из трех уравнений с тремя неизвестными токами:

$$I,\ I_1 \text{ и } I_2.$$

Выразим значение тока I_2 при помощи первого и второго уравнений и приравняем друг другу полученные результаты:

$$I_2 = I - I_1 = I_1 - 60.$$

Из последнего равенства легко заключить, что

$$I = 2I_1 - 60.$$

Но из третьего уравнения можно найти, что

$$I = 108 - 0,1\, I_1,$$

откуда

$$2I_1 - 60 = 108 - 0,1\, I_1$$

или

$$2,1\, I_1 = 168,$$

или $I_1 = 80\, a$. После чего легко находится:

$$I = 2I_1 - 60 = 160 - 60 = 100\, a,$$

$$I_2 = I - I_1 = 100 - 80 = 20\, a.$$

2-26. ВЫБОР ПРОВОДОВ И ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

В разобранных ранее примерах нам уже приходилось выбирать провода, исходя из заданной величины потери напряжения, а полученный результат округлять до ближайшего стандартного сечения.

Стандартными сечениями для проводов являются: 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10, 16, 25; 35; 50; 60; 70; 95; 120; 150; 185; 240 *мм*².

Провода до 10 *мм*² включительно применяются лишь внутри помещений, а начиная с 16 *мм*²—как внутри помещений, так и на линиях передачи. Условное обозначение провода состоит из буквы и цифры. Например, обозначение М-70 надо понимать так: голый, т. е. неизолированный, медный провод сечением 70 *мм*²; обозначение А-240 алюминиевый сечением 70 *мм*². Применяются также и алюминиевые провода, в которых внутренняя часть делается стальной, а наружная — алюминиевой, и стальные. Первые обозначаются буквами АС, а вторые — буквами ПС.

После того как мы убедились, что напряжение, теряемое в проводе, не превосходит допустимой величины, надо проверить, нет ли опасности чрезмерного перегрева этих проводов. Для каждой марки провода существует предельное значение тока, который по нему может быть пропущен.

Для воздушных линий передачи при температуре 25° С допускаются нагрузки (в амперах), указанные в табл. 2-2.

В качестве примера выберем провода при таких условиях работы: э. д. с. генератора равна 1 000 *в*, его внутрен-

ТАБЛИЦА 2-2

Наибольшие значения длительно протекающих токов в проводах воздушных линий электропередач

Марка / Сечение	М	А	АС	ПС
16	130	—	—	—
25	180	135	—	60
35	220	170	170	25
50	270	215	220	90
70	340	265	275	125
95	415	325	355	140
120	485	375	380	—
150	570	440	445	—
185	645	500	515	—
240	770	610		

нее сопротивление 0,04 *ом*; напряжение у потребителя 900 *в*, забираемая им мощность 270 *квт*, расстояние между генератором и потребителем 200 *м*; провода—алюминиевые.

Ток в линии равен частному от деления мощности потребителя на соответствующее напряжение, т. е.

$$I = \frac{270 \cdot 1\,000 \text{ вт}}{900 \text{ в}} = 300 \text{ а}.$$

Сопротивление генератора и линии равно частному от деления потери напряжения на величину тока

$$r = \frac{1\,000 \text{ в} - 900 \text{ в}}{333 \text{ а}} = 0,3 \text{ ом},$$

причем на долю проводов приходится 0,3 — 0,04=0,26 *ом*.

Удельное сопротивление алюминия равно $\frac{1}{34}$ *ом* на 1 *м* при 1 *мм*², и, следовательно, сечение проводов

$$S = \frac{400}{34 \cdot 0,26} = 45 \text{ мм}^2.$$

Этому результату соответствует ближайшее стандартное сечение 50 *мм*². В соответствии с этим следовало бы выбрать провод марки А-50, но это оказывается недопустимым из условий нагрева. Из таблицы следует, что наименьшим сечением, по которому может быть пропущен ток в 300 *а*, обладает провод А-95, на котором мы и останавливаемся.

Для защиты линий от коротких замыканий применяются плавкие предохранители (см. стр. 66). Такие предохранители рассчитаны на определенную величину предельно допустимого тока.

Если передача энергии производится по трехпроводной линии, то плавкие предохранители устанавливаются лишь в крайних проводах, но не в среднем.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

МАГНИТЫ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

3-1. МАГНИТЫ И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магниты. Свойства магнитов притягивать железные предметы (рис. 3-1а) и отклонять компасную стрелку (рис. 3-1б) всем хорошо знакомы.

Компасная стрелка—это тоже магнит, но очень маленький и легкий Стрелка укреплена на игле и может свободно поворачиваться. Если ничто не мешает стрелке, она повернется так, что один из ее концов (*С*) обращается

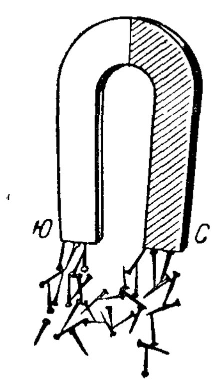


Рис. 3-1а. Подковообразный магнит притягивает железные тела.

На рисунке изображена цепочка гвоздей, притянутая магнитом Каждый из гвоздей, приближаясь к магниту, сам становится магнитом и способен притягивать другие гвозди

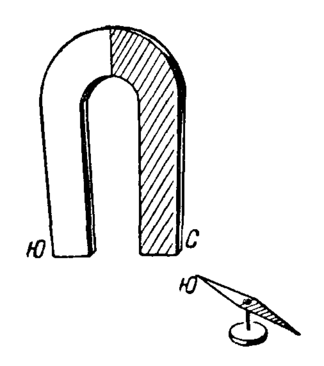


Рис. 3-1б. Компасная стрелка поворачивается магнитом. ее южный полюс стремится повернуться к северному полюсу магнита.

к северу, а другой (*Ю*)—к югу. Это удивительное свойство компасной стрелки было открыто более 3000 лет назад в Китае и с тех пор применяется путешественниками (рис. 3-2).

Магнитные полюсы. Каждый магнит обладает двумя полюсами—северным (*С*) и южным (*Ю*). Северный полюс

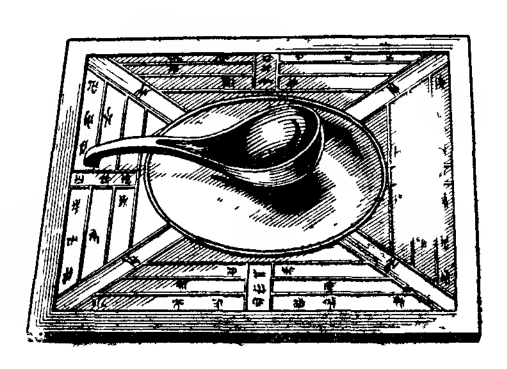


Рис. 3-2 Древнекитайский компас.

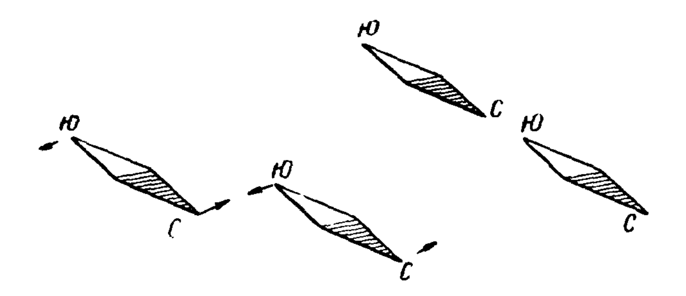


Рис. 3-3 На рисунке слева показаны два компаса. Их полюсы действуют друг на друга. Одноименные магнитные полюсы отталкиваются, разноименные притягиваются. Стрелками показаны силы, действующие на полюсы. Поворачиваясь вокруг своих осей, стрелки займут положение, показанное на правой части рисунка.

компасной стрелки обращается к северу, южный—к югу.

Простые опыты (рис. 3-3, 3-4) показывают, что

одноименные полюсы магнитов отталкиваются один от другого, а разноименные—притягиваются.

Сама наша Земля—это огромный магнит: около северного географического полюса лежит ее южный магнитный полюс, а около южного географического полюса лежит ее северный магнитный полюс. Поэтому-то к северному географическому полюсу и притягивается северный полюс магнитной стрелки (рис. 3-5).

Магнитное поле. От концов компасной стрелки до магнитных полюсов Земли несколько тысяч километров. Как же они воздействуют на таком расстоянии на компас?

Обычно взаимодействие между телами происходит при их соприкосновении. Действительно, если нужно затянуть гайку, мы прежде всего приводим в соприкосновение с ней гаечный ключ и поворачиваем его — ключ касается гайки, рука налегает на ключ.

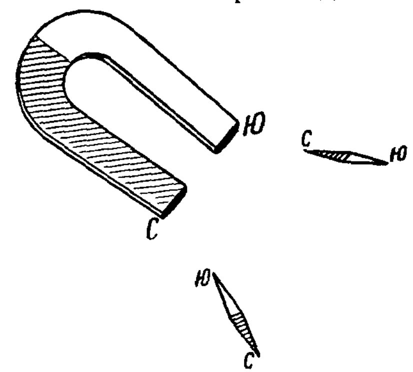


Рис. 3-4. На рисунке показаны постоянный магнит и рядом с ним два компаса.

Положите на стол стальной шарик (хотя бы от подшипника) и приблизьте к нему магнит: шарик покатится к магниту прежде, чем они коснутся друг друга (рис. 3-6).

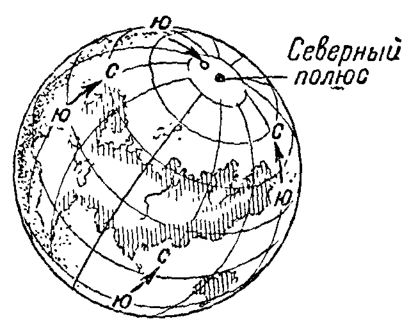


Рис. 3-5. Земля около северного географического полюса имеет южный магнитный полюс; ее северный магнитный полюс—около южного географического. Поэтому компасные стрелки стремятся показывать северным концом на север.

Значит, магнитные свойства заключены не только в теле самого магнита с его полюсами, но и в окружающем его пространстве. В пространстве, окружающем магнит, существует магнитное поле.

Магнитное поле — один из видов материи, один из видов ее проявления. Магнитное поле может наблюдаться как в воздухе, так и в безвоздушном пространстве. Ему не мешают ни камни, ни дерево, ни металлы — оно как бы пронизывает их. Железо и подобные ему металлы способны усиливать магнитное поле. Внимательно просмотрите рис. 3-7 — 3-9.

В магнитном поле заключена энергия. В самом деле, под действием магнитного поля возникают силы, приводящие в движение тела: поворачивающие стрелку, притягивающие гвозди, заставляющие катиться шарик. За счет энергии, запасенной в магнитном поле, совершается работа.

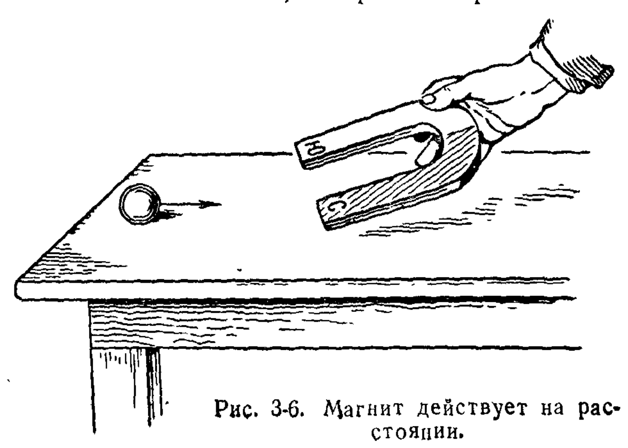


Рис. 3-6. Магнит действует на расстоянии.

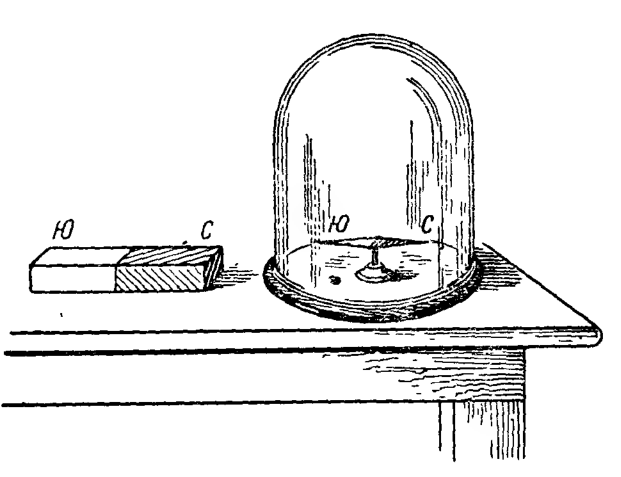


Рис. 3-7. Магнитная стрелка помещена под стеклянный колпак, из которого выкачан воздух. Стержневой магнит, расположенный рядом, оказывает на компасную стрелку такое же действие, как в воздухе.

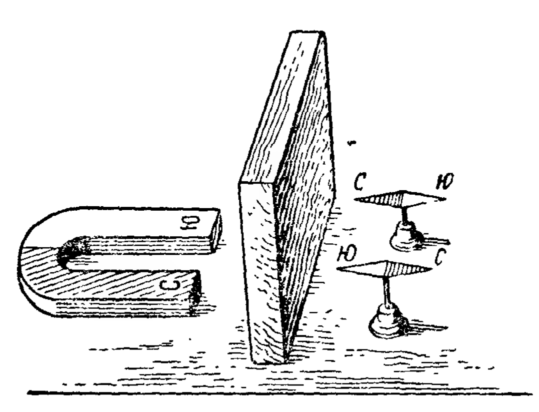


Рис. 3-8. Расположив между магнитом и стрелкой деревянную доску или металлическую (но не железную) пластину, легко убедиться, что действие магнита на компас не изменится.

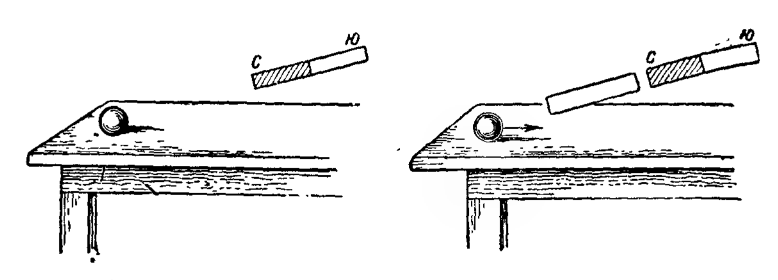


Рис. 3-9. Слева показаны стальной шарик и стержневой магнит. Расстояние между ними слишком велико, и шарик остается неподвижным: магнитное поле в месте расположения шарика слишком слабо. Справа к тому же стержневому магниту приставлен железный брусок. Магнитное поле усилено железным бруском, и шарик покатился.

3-2. МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Электрический ток производит магнитное действие (рис. 3-10 и 3-11). Другими словами, вокруг проводника с током образуется магнитное поле. Это замечательное открытие, и его дальнейшее изучение скоро привело к важ-

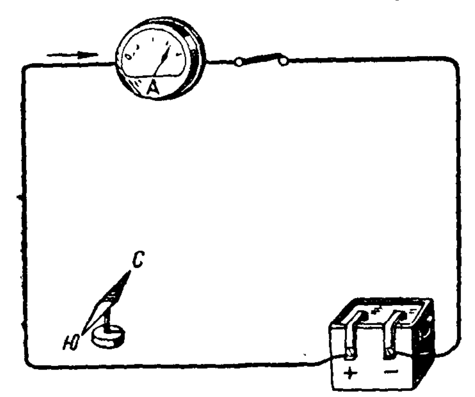


Рис. 3-10. Магнитная стрелка обращена северным полюсом на север, когда цепь тока разомкнута (тока нет).

ным практическим следствиям: электрические машины (двигатели и генераторы), электромагниты, телеграфные и телефонные аппараты основаны именно на взаимодействии электрического тока и магнитного поля.

Ясно, что изучающим электротехнику очень важно понять законы взаимодействия электрического тока и магнитного поля.

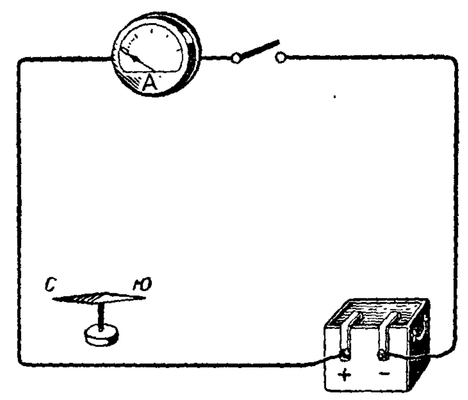


Рис. 3-11. Магнитная стрелка поворачивается под действием тока. Ток течет в проводах по ходу часов; северный конец стрелки повернут от нас. Если изменить направление тока, положение стрелки изменится на прямо противоположное: северный конец обернется к нам.

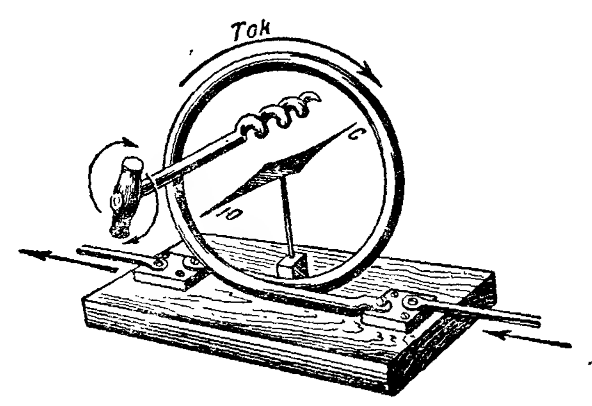


Рис. 3-12. Правило штопора.

На рисунке изображены круговой ток и расположенная на его оси компасная стрелка. Если винт или штопор поворачивать по направлению кругового тока, он будет ввинчиваться в направлении от южного конца к северному концу компасной стрелки.

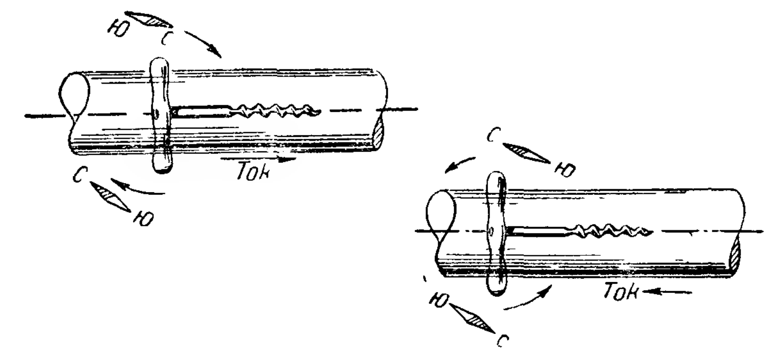


Рис. 3-13. Правило штопора.

На рисунке изображены прямолинейные проводники с током и по две компасные стрелки, расположенные вблизи проводников. Они повернуты в определенном направлении магнитным полем тока. Северные концы компасных стрелок показывают, в каком направлении нужно вращать рукоятку, чтобы штопор ввинчивался по направлению тока.

Правило штопора. Направление, в котором ток стремится повернуть компасную стрелку, легко определить, пользуясь правилом штопора (рис. 3-12 и 3-13).

3-3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ДЕЙСТВУЕТ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Тот оказывает силовое действие на магниты. Значит, нужно ожидать, что магниты также оказывают силовое действие на проводник с током. Действительно, если расположить провод с током между полюсами магнита, на этот провод будет действовать сила. Величина этой силы зависит от тока, от размеров проводника и, конечно, от того, находится проводник в сильном или в слабом магнитном поле; в сильных магнитных полях электрических машин развиваются огромные усилия, способные поворачивать валы больших прокатных станов.

Наконец, эта сила зависит от того, в каком направлении расположен проводник по отношению к магнитным полюсам или, точнее, по отношению к направлению магнитного поля.

3-4. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ ИЛИ СИЛА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Мы несколько раз говорили, что магнитное поле может быть сильнее или слабее и что оно имеет направление. Действительно, вспомним, что в разных точках пространства около полюсов магнита стрелка компаса повертывается по-разному.

Магнитные явления очень важны для электротехников, поэтому займемся более подробным рассмотрением магнитного поля. Установим прежде всего количественную меру, пользуясь которой можно сравнивать между собой разные магнитные поля и производить расчеты.

Сила магнитного поля определяется количественным значением величины, носящей название магнитной индукции, а также ее направлением.

Определяя скорость тела, недостаточно сказать 50 *м/сек*, нужно еще сказать, в каком направлении это тело движется, например: под углом 45° к горизонту в направлении с востока на запад.

В этом отношении магнитная индукция похожа на такие величины, как скорость. Для ее полного определения нужно знать не только ее значение, но и направление.

Направление. В качестве направления магнитной индукции (силы магнитного поля) принято считать то направление, в котором располагается северный конец магнитной стрелки.

Количественное значение. Мерой количественного значения магнитной индукции может служить механическая сила, действующая на проводник с током; чем больше сила, испытываемая проводником, тем сильнее магнитное поле.

Единицы измерения магнитной индукции. Сила магнитного поля (магнитная индукция) выражается в гауссах (сокращенно *гс*) [1].

Магнитная индукция земного поля порядка 0,5 *гс*.

В электрических машинах и трансформаторах магнитная индукция порядка 10 000 *гс*.

В лабораторных условиях достигаются поля порядка нескольких сотен тысяч гаусс.

3-5. СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Расположим прямолинейный проводник перпендикулярно к направлению поля, т. е. расположим проводник так,

---

[1] Другой единицей, в 10 000 раз более крупной, является вольт-секунда на кв. метр (*в · сек/м²*):

$$в \cdot сек/м^2 = 10^4\ гс.$$

Причина введения такой единицы и смысл ее наименования вольт-секунда на кв. метр станут ясны из дальнейшего изложения.

чтобы он образовывал прямой угол с компасной стрелкой (рис. 3-14). В таких условиях опыт показывает, что на проводник действует сила F, прямо пропорциональная произведению магнитной индукции B, длине проводника l и току I.

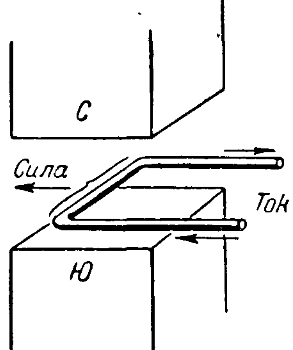


Рис. 3-14. Проводник с током расположен между полюсами магнита.

В таком устройстве легко измерить силу, действующую на участок проводника, отмеченный фигурной скобкой. Силы, действующие на параллельные участки проводов, взаимно уравновешиваются.

Это значит, что двукратное увеличение магнитного поля B приводит к двукратному увеличению силы F; десятикратное увеличение тока I влечет за собой десятикратное увеличение силы и т. д.

Сила F пропорциональна произведению указанных величин, но это еще не значит, что она просто равна этому произведению. Для того чтобы найти значение силы, нужно произведение индукции B, длины l и тока I еще умножить на коэффициент (множитель) k. Этот последний множитель k зависит от того, в каких единицах выражаются магнитная индукция, ток и длина проводника, а также от того, в каких единицах мы хотим получить выражение для силы.

Сказанное можно представить такой математической формулой:

$$F = k \cdot B \cdot l \cdot I;$$

здесь F — сила;
B — индукция;
l — длина проводника;
I — ток.

Все величины, стоящие в правой части равенства, нужно перемножить друг на друга и еще умножить на коэффициент (множитель) k, зависящий от выбора единиц.

Если выбрать такие единицы: килограмм (*кГ*), гаусс (*гс*), сантиметр (*см*) и ампер (*а*), то множитель пропорциональности (k) следует принимать равным $1{,}02 \cdot 10^{-7}$.

10^{-7}—это одна десятимиллионная.

Умножить на 10^{-7}—это то же, что разделить на 10^7, т. е. разделить на 10 млн.

Запишем все сказанное в виде таких двух формул:

$$\text{сила } (кГ) = 1{,}02 \cdot 10^{-7} \times \text{магнитная индукция } (гс) \times \times \text{длина провода } (см) \times \text{ток } (а)$$

и сокращенно

$$F\,(кГ) = 1{,}02 \cdot 10^{-7} \cdot B\,(гс) \cdot l\,(см) \cdot I(а).$$

Единицы измерения можно выбрать таким образом, что множитель k окажется равным единице и может быть опущен. Для этого длину проводника надо выразить в метрах, магнитную индукцию—в вольтсекундах на квадратный метр и силу — в ньютонах.

Примеры вычисления силы, действующей на прямолинейные провода, расположенные перпендикулярно магнитному полю

Пример 1. Провод длиной 1 *м* расположен перпендикулярно направлению магнитного поля (рис. 3-14). Магнитная индукция равна 15 000 *гс*. Ток в проводе равен 200 *а*. Чему равна механическая сила, действующая на провод?

Пользуясь приведенной выше формулой, найдем: *сила*$=1{,}02 \cdot 10^{-7} \times 15\,000$ *гс* $\cdot$ 200 *а* $\cdot$ 100 *см*$=30{,}6$ *кГ*$=300$ *н*.

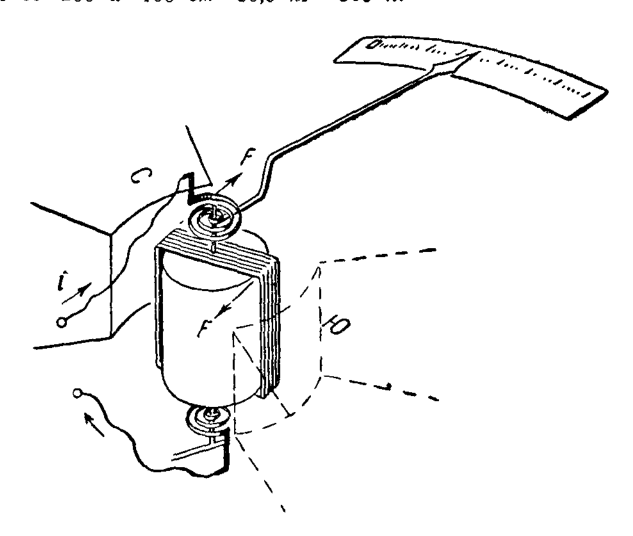


Рис. 3-15. Упрощенное изображение рамки измерительного прибора.

Между полюсами *С* и *Ю* расположена подвижная рамка, намотанная из сотни проводов Ток к подвижной рамке подводится через тонкие спиральки. Для наглядности рисунка показаны только концы постоянного магнита *С* и *Ю*; один из них изображен прозрачным.

Такого порядка силы мы встречаем в электрических машинах, где, однако, в магнитном поле располагается не один провод, а целый ряд проводов (обмотка машины).

Пример 2. В магнитном поле с индукцией 1 000 *гс* расположено 100 связанных между собой проводничков с током 1 *ма* в каждом. Длина каждого из проводничков 2 *см*. Проводнички расположены перпендикулярно к направлению магнитного поля. Чему равна сила, действующая на связку проводничков?

сила $= 1{,}02 \cdot 10^{-7} \cdot 1\,000 \cdot 0{,}001 \cdot 2 \cdot 100 \approx 2{,}04 \cdot 10^{-5}$ *кГ* $= 0{,}0204$ *Г* $= 0{,}2$ *мн*. (*мн* — миллиньютон, т. е. одна тысячная доля ньютона).

Такого порядка силы мы встречаем в измерительных приборах, где по тонким проводам рамки (рис. 3-15) проходит малый измеряемый ток. Боковые стороны рамки расположены между полюсами постоянного магнита и стальным цилиндром. Этот цилиндр введен для того, чтобы усилить поле. Небольшой силы в сотые доли грамма достаточно, чтобы повернуть рамку и связанный с ней указатель (стрелку). Повороту рамки препятствуют слабые пружинки. Поэтому чем больше ток, протекающий по рамке, тем на больший угол повернется указатель.

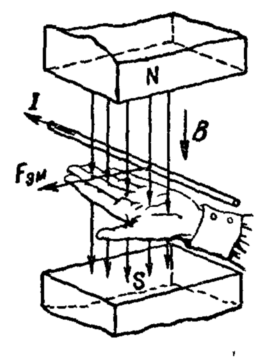


Рис. 3-16. Правило левой руки.

Правило левой руки. Направление силы, действующей на проводник, определяется по правилу левой руки (рис. 3-16).

Если расположить ладонь левой руки таким образом, чтобы магнитное поле было направлено к ладони (входило в ладонь), а четыре вытянутых пальца направить вдоль электрического тока, то отогнутый большой палец укажет направление силы.

3-6. НАГЛЯДНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Проведем в магнитном поле ряд непрерывных линий так, чтобы эти линии всюду совпадали с направлением силы поля (с направлением магнитной индукции). Полученная картина может служить изображением магнитного поля.

Если перемещать вдоль линии магнитного поля маленькую, свободно подвешенную компасную стрелку, то ее ось всюду будет совпадать с близлежащим участком линии. На

одной из линий рис. 3-17 изображены компасные стрелки в четырех положениях.

На рис. 3-17—3-18 посредством линий изображены магнитные поля постоянного магнита и прямолинейного проводника с током. Стрелки на линиях показывают направле-

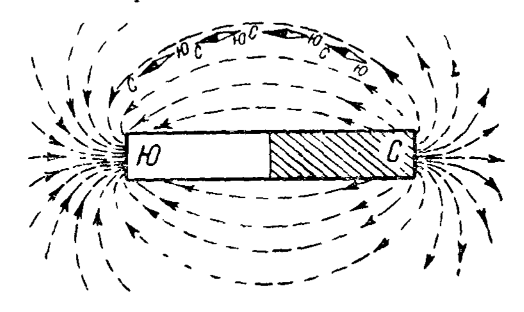


Рис. 3-17. Магнитное поле стержневого магнита.

ние магнитного поля (то направление, которое указывал бы северный конец компасной стрелки).

Для того чтобы по рисунку можно было судить и о силе поля, условились проводить линии тем ближе одна к другой, чем сильнее поле.

Из рис. 3-17 видно, что самое сильное поле непосредственно около полюсов магнита. Из рис. 3-18 видно, что

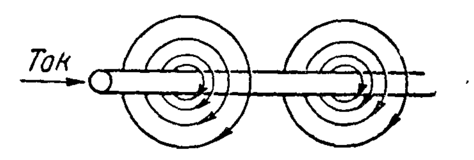


Рис. 3-18. Магнитное поле прямолинейного проводника с током. Сопоставьте рисунок с рис. 3-13.

поле тока сильнее всего около провода, а по мере удаления от него поле ослабевает.

В § 3-1 говорилось, что небольшие железные тела под влиянием магнита сами становятся магнитами (рис. 3-1а). Поэтому понятно, что если положить на доску постоянный магнит и посыпать доску железными опилками, то они расположатся так, как расположились бы маленькие компасные стрелки. Картины, получаемые посредством опилок, дают наглядное представление о поле (рис. 3-19 и 3-20).

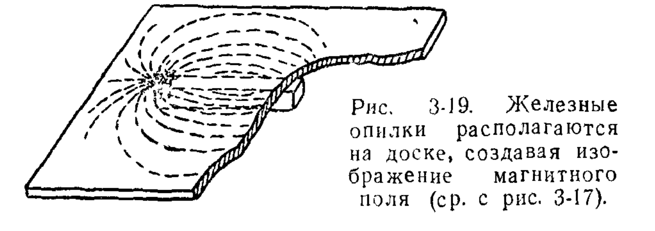


Рис. 3-19. Железные опилки располагаются на доске, создавая изображение магнитного поля (ср. с рис. 3-17).

На рис. 3-20 и 3-21 изображено магнитное поле катушки.

Если свернуть провод спиралью, намотав его как катушку, то одинаково направленные поля отдельных витков

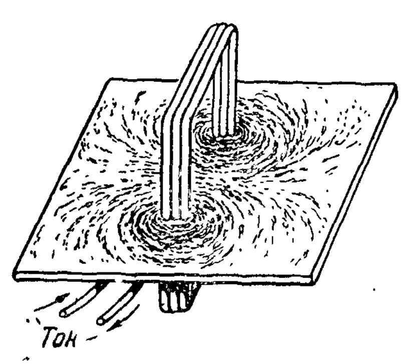


Рис. 3-20. Железные опилки насыпаны на лист картона, через который пропущены витки проволоки с током.

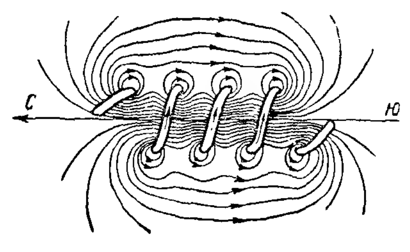


Рис. 3-21. Картина магнитного поля катушки.

сложатся друг с другом, усиливая поле внутри катушки. Направление магнитной линии совпадает с осью катушки, и поле достигает там наибольшей величины (рис. 3-21). Поле внутри катушки приблизительно однородно, т. е. сила поля остается приблизительно одинаковой в различных точках. Одинаковыми будут и расстояния между соседними магнитными линиями, имеющими наибольшую плотность внутри катушки.

3-7. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ТОКОВ

Мы уже знаем, во-первых, что проводник с током создает вокруг себя магнитное поле, во-вторых, что проводник с током, находясь в магнитном поле, подвергается воздействию силы.

Из этого вытекает такое следствие: два провода с током должны воздействовать один на другой. В самом деле, рассмотрим два параллельных провода, по которым токи текут в противоположных направлениях (рис. 3-22).

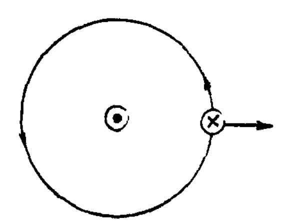


Рис. 3-22. Провода с противоположно направленными токами взаимно отталкиваются.

На рисунке изображено сечение проводов плоскостью чертежа. Направление токов схематически изображено точкой (острие стрелки, направленной к нам) и крестиком (хвост стрелки, направленной от нас). Кольцевая линия показывает магнитное поле первого тока. Применяя правило левой руки для определения силы, действующей на второй провод, нужно расположить левую руку ладонью вниз и вытянуть четыре пальца в сторону чертежа. Отогнутый большой палец покажет, что сила направлена вправо.

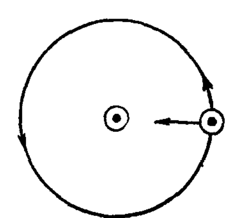


Рис. 3-23. Провода с одинаково направленными токами взаимно притягиваются.

Ток первого из них создает вокруг себя магнитное поле, показанное на рис. 3-22 одной круговой линией. Эта линия проходит через второй провод. Применяя правило левой руки ко второму проводу, легко убедиться в том, что он отталкивается от первого.

Сила, с которой первый ток, направленный на нас, действует на второй, равна по величине и противоположна по направлению той силе, с которой второй ток действует на первый. В качестве самостоятельного упражнения рекомендуем читателю разобрать этот же пример, рассматривая магнитное поле второго тока, действующее на первый ток.

Итак:

> *между направленными в противоположные стороны токами существуют силы отталкивания. Между токами одинакового направления существуют силы притяжения.*

Доказательство этого предоставляем читателю (рис. 3-23).

Вычисление силы взаимодействия прямолинейных параллельных проводов. Покажем, как вычисляется величина

силы взаимодействия двух прямолинейных параллельных проводов, обтекаемых токами. Вокруг прямолинейного провода с током I создается магнитное поле, индукция которого равна:

$$B = \frac{0,2\ I}{d};$$

здесь d—расстояние от оси провода до той точки поля, индукцию в которой мы ищем; очевидно, что чем больше это расстояние, тем меньше соответственное значение магнитной индукции. Множитель 0,2 подобран с таким расчетом, что, измеряя ток I в амперах, а расстояние d в сантиметрах, мы будем получать значение магнитной индукции в гауссах.

Если в магнитном поле, созданном током I, находится другой провод с током I', то сила, на него действующая, равна (см. формулу § 3-5):

$$F\,(кГ) = 1,02 \cdot 10^{-7} \cdot B\,(гс) \cdot I'\,(а) \cdot l\,(см).$$

Рассчитаем силу взаимодействия между двумя проводами, расстояние между которыми равно 20 *см*, в условиях короткого замыкания, т. е. при очень большом токе, например в 30 000 *а*. Первый провод создает поле, индукция которого на расстоянии 20 *см* оказывается равной:

$$B = \frac{0,2 \cdot 30\,000\ а}{20\ см} = 300\ гс.$$

Если длина проводов равна 1 *м* = 100 *см*, то сила взаимодействия проводов

$$F = 1,02 \cdot 10^{-7} \cdot 300 \cdot 30\,000 \cdot 100 = 91,8\ кГ = 900\ н.$$

3-8. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА МАГНИТНОМ ДЕЙСТВИИ ТОКОВ

А. Электромагнитные приборы. Магнит притягивает железные предметы—это одно из первых наблюдений, описанных в начале главы.

Но теперь мы знаем, что катушка проводов с током создает магнитное поле подобно постоянному магниту. В этом легко убедиться, сравнивая между собой картины магнитных полей постоянного магнита (рис. 3-17) и катушки (рис. 3-20 и 3-21).

Спрашивается, не будут ли притягиваться железные предметы к катушке с током?

Опыт подтверждает высказанное предположение:

> *железо втягивается магнитным полем внутрь катушки.*

На этом свойстве железа основано устройство электромагнитного амперметра—самого простого и дешевого измерительного прибора (рис. 3-24). Железный лепесток *с* втягивается магнитным полем внутрь катушки *А* (для наглядности рисунка катушка разрезана). На одной оси с лепестком закреплены указательная стрелка *а* прибора и грузик *b*—он стремится вернуть стрелку к начальному положению.

Чем больше протекающий в обмотке ток, тем сильнее втягивается железный листок в магнитное поле, тем сильнее отклоняется стрелка.

Изменение направления тока никак не повлияет на работу прибора. В самом деле, кусочки железа одинаково притягиваются к северным и южным концам магнита.

Поэтому электромагнитные приборы могут применяться и для измерения переменного тока.

Заметим, что электромагнитные приборы не отличаются высокой точностью.

Б. Магнитоэлектрические приборы. Измерительные приборы, основанные на взаимодействии между измеряемым током и полем постоянного магнита, называются магнитоэлектрическими.

Измеряемый ток пропускается через обмотку подвижной рамки. Рамка находится между полюсами постоянного магнита и укреплена на оси, вокруг которой она может поворачиваться (рис. 3-15), увлекая за собой указательную стрелку. Такой прибор нами уже рассматривался в § 3-5.

Направление силы, с которой магнит действует на рамку с током, может быть найдено по правилу левой руки. В положении, показанном на чертеже, магнитное поле стремится поворачивать рамку в направлении хода часовой стрелки. Повороту рамки препятствует спиральная пружина, угол закручивания которой пропорционален действующей на рамку силе, т. е. пропорционален току[1]. С рамкой связана указательная стрелка прибора.

[1] Приборы магнитоэлектрической системы имеют поэтому равномерную шкалу: двукратному увеличению тока соответствует двукратное отклонение стрелки.

Отклонение стрелки прибора влево или вправо зависит от направления тока. Поэтому приборы описываемой магнитоэлектрической системы пригодны только для измерения токов постоянного направления.

Сопоставление конструкций приборов электромагнитных и магнитоэлектрических позволяет легко обнаружить существенное различие между ними. Неподвижная катушка электромагнитных приборов может быть выполнена из толстого провода, по которому можно пропустить токи

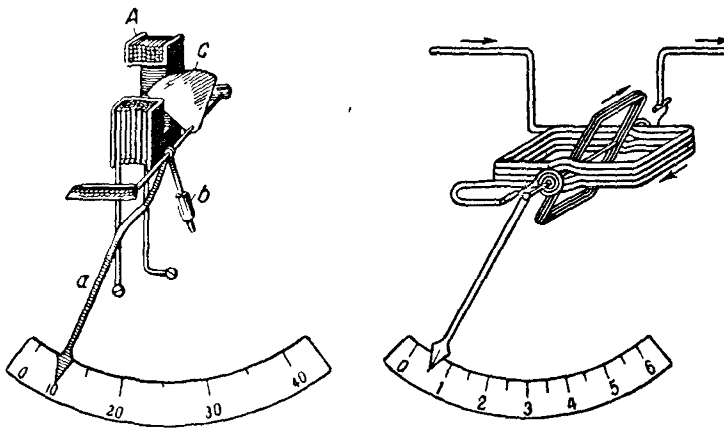


Рис. 3-24. Устройство электромагнитного амперметра.

Рис. 3-25. Устройство электродинамического измерительного прибора.

в десятки и даже сотни ампер. Подвижная катушка—рамка магнитоэлектрических приборов—изготовляется из тонких проводов, рассчитанных на очень малый ток (тысячные и даже миллионные доли ампера).

В. Электродинамические измерительные приборы. На явлении взаимодействия двух токов основано устройство электродинамических измерительных приборов. Устройство такого прибора показано на рис. 3-25. Прибор содержит две катушки—подвижную и неподвижную. Подвижная катушка укреплена на оси. С той же осью связан указатель (стрелка). Появление токов в обеих катушках приводит к тому, что под влиянием силы их взаимодействия подвижная рамка начнет поворачиваться. При направлении токов, показанном на рис. 3-25, рамка стремится повернуться против часовой стрелки. В этом легко убедиться, если вспомнить, что параллельные провода отталкиваются один от

другого, когда токи в них направлены различно (ср. рис. 3-23).

Обратите внимание, что направление силы не изменится, если изменить направление тока во всей цепи, т. е. одновременно изменить направление тока и в подвижной и неподвижной катушках. Различно направленные токи по-прежнему отталкивают друг друга.

Стрелка электродинамического прибора отклоняется независимо от направления тока. Поэтому он может применяться как в цепях переменного, так и в цепях постоянного тока.

Если предоставить рамку самой себе, то она установится таким образом, что плоскости обеих катушек совпадут. Но тогда показания прибора были бы одинаковыми при любых значениях протекающих через катушки токов.

Поэтому приходится ограничивать величины угла поворота подвижной рамки. Этой цели служит спиральная пружина, противодействующая повороту рамки. Пружина будет сжиматься тем сильнее, чем больше величина действующей на нее силы, т. е. тем больше сила взаимодействия между катушками, чем больше ток. На рис. 3-25 показано последовательное соединение подвижной и неподвижной катушек. Но катушки могут соединяться и параллельно. В последнем случае токи по катушкам распределяются обратно пропорционально сопротивлениям катушек[1].

Г. Добавочные сопротивления и добавочные ветви (шунты). Рассматривая тепловой измерительный прибор (см. § 2-14), мы подчеркивали общность и различие приборов для измерения тока (амперметров) и напряжения (вольтметров). Как в тепловых, так и в магнитных приборах отклонение стрелки зависит в равной мере от протекающего тока I и от приложенного напряжения U — ведь эти две величины неразрывно связаны между собой:

$$U = I \cdot r,$$

где r — сопротивление прибора.

Различие между амперметрами и вольтметрами заключается, собственно говоря, только в подборе величины сопротивления.

Мы знаем (см § 2-14), что сопротивление вольтметра должно быть велико, сопротивление амперметра—мало.

[1] В обоих случаях сила, поворачивающая катушку, пропорциональна квадрату общего тока В отличие от приборов магнитоэлектрической системы шкала электродинамических приборов неравномерна: увеличению тока в 2 раза соответствует увеличение отклонения в 4 раза.

А если сопротивление самой измерительной системы получается не таким, как нужно?

В таком случае включают добавочное сопротивление или добавочную ветвь (шунт).

Поясним сказанное примерами.

Пример 1. Пусть магнитоэлектрический прибор имеет сопротивление $r=10$ *ом* и чувствительность 0,01 *ма* на одно деление при 100 делениях полной шкалы. Это значит, что полное отклонение стрелки соответствует 1 *ма* или 0,01 *в* = 10 *ом* · 1 *ма*.

Спрашивается, какое нужно включить добавочное сопротивление для того, чтобы воспользоваться этим прибором для измерения напряжения до 10 *в*?

Решение (рис. 3-26). Для того чтобы при 10 *в* стрелка отклонилась на 100 делений, нужно, чтобы при этом напряжении в цепи протекал ток в 1 *ма*. Следовательно, сопротивление вольтметра должно равняться:

$$r_в = \frac{10\ в}{0,001\ а} = 10\,000\ ом.$$

Но сопротивление самого прибора 10 *ом*, значит нужно ввести добавочное сопротивление, равное:

$$r_д = 10\,000 - 10 = 9\,990\ ом.$$

Пример 2. Тем же прибором нужно воспользоваться как амперметром для измерения тока в 0,05 *а*.

Спрашивается, каким сопротивлением должна обладать ветвь, подключаемая параллельно к прибору?

Решение (рис. 3-27). Для того чтобы при токе $I=0,05$ *а* стрелка отклонялась на 100 делений, нужно, чтобы напряжение на приборе равнялось одной сотой вольта ($U=0,01$ *в*).

Равноценная проводимость прибора и дополнительной параллельной ветви при этом должна быть равна

$$\frac{I}{U} = \frac{0,05\ а}{0,01\ в} = 5\frac{1}{ом}.$$

Проводимость самого прибора всего $0,1\frac{1}{ом}$. Значит, проводимость добавочной ветви должна составить

$$\frac{1}{r_д} = 5 - 0,1 = 4,9\frac{1}{ом},$$

а ее сопротивление

$$r_д = \frac{1}{4,9} = 0,204\ ом.$$

Пример 3. Тот же прибор должен служить для измерения тока 5 *а*. Расчет (такой же, как в примере 2) показывает, что для этого нужно было бы в добавочную ветвь включить очень малое сопротивление.

Однако по техническим условиям трудно изготовить добавочную ветвь, сопротивление которой меньше 0,01 *ом*. В таком случае можно

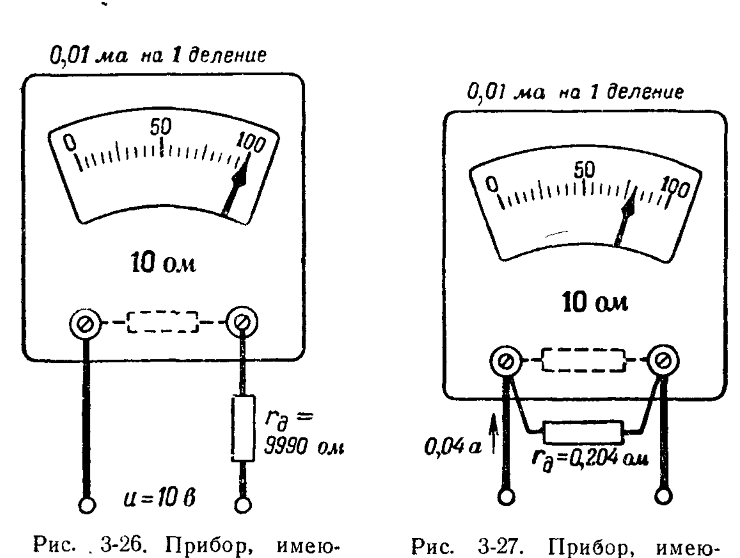


Рис. 3-26. Прибор, имеющий внутреннее сопротивление 10 *ом* и чувствительность 1 *ма* на 100 делений шкалы, снабжен добавочным сопротивлением $r_д$ = 9 990 *ом*. Такой прибор может служить для измерения напряжения до 10 *в*.

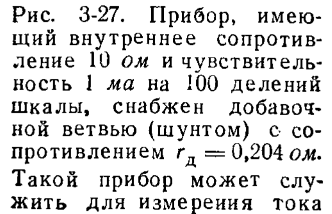


Рис. 3-27. Прибор, имеющий внутреннее сопротивление 10 *ом* и чувствительность 1 *ма* на 100 делений шкалы, снабжен добавочной ветвью (шунтом) с сопротивлением $r_д$ = 0,204 *ом*. Такой прибор может служить для измерения тока до 0,05 *а*.

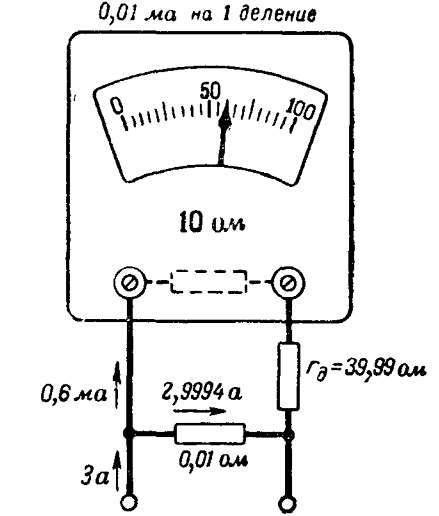


Рис. 3-28. Прибор, имеющий внутреннее сопротивление 10 *ом* и чувствительность 1 *ма* на 100 делений шкалы, снабжен добавочным сопротивлением $r_д$ = 39,99 *ом* и добавочной параллельной ветвью с сопротивлением 0,01 *ом*. Такой прибор может служить для измерения тока до 5 *а*.

включить последовательно с обмоткой добавочное сопротивление $r_д$, после чего параллельно подключить ветвь, 0,01 *ом* (рис. 3-28). Чему должно быть равно добавочное сопротивление $r_д$?

Решение. Общий ток 5 *а* должен разветвляться так, чтобы через прибор шел ток 1 *ма*, а остальной ток

$$5\ а - 1\ ма = 5{,}000 - 0{,}001 = 4{,}999\ а$$

проходил через добавочную ветвь с сопротивлением 0,01 *ом*.

Очевидно, что в таком случае на каждой из параллельных ветвей установится одинаковое напряжение

$$U = 4{,}999\ а \cdot 0{,}01\ ом = 0{,}04999\ в.$$

Под действием такого напряжения через прибор должен проходить ток в 1 *ма*.

Этот ток должен пройти через сопротивление самого прибора 10 *ом* и через добавочное сопротивление $r_д$. Значит,

$$U = 0{,}001\ а\,(r + r_д) = 0{,}04999\ в = 0{,}001\ а \cdot (10\ ом + r_д).$$

В скобках стоит полное сопротивление второй параллельной ветви, содержащей неизвестное еще сопротивление $r_д$.

Решая полученное уравнение, определим $r_д$. Для этого разделим левую и правую части равенства на 0,001 *а*. Тогда получаем:

$$49{,}99\ ом = 10\ ом + r_д$$

или

$$r_д = 39{,}99\ ом.$$

Если вместо этого включим добавочное сопротивление 40 *ом*, погрешность будет совершенно ничтожной.

Из трех рассмотренных примеров видно, как можно расширить область применения одного и того же прибора.

Часто целый ряд добавочных сопротивлений и добавочных ветвей встроен в самый прибор. Переводя переключатель (на самом приборе) в разные положения, можно применять один и тот же прибор для разных измерений. Часто в таких приборах наносится сразу несколько шкал для отсчета показаний. Каждой из этих шкал следует пользоваться при вполне определенных положениях переключателя.

Заметим в заключение, что малые сопротивления добавочных ветвей (шунтов) могут оказаться почти такого же порядка, как и сопротивления соединительных проводов. Поэтому обычно для присоединения этих ветвей применяются вполне определенные (калиброванные) провода.

Д. Электродинамический ваттметр. Электродинамический прибор с двумя катушками (рис. 3-25) может служить для измерения мощности, т. е. может применяться в качестве ваттметра.

Присоединим обмотки катушек электродинамического прибора к осветительной сети, как это показано на рис. 3-29 Неподвижная обмотка (обмотка тока) включена в разрез рабочего провода, и через нее проходит тот же ток, что и через лампы. Подвижная обмотка (обмотка напряжения) включена между рабочими проводами, т. е. находится под

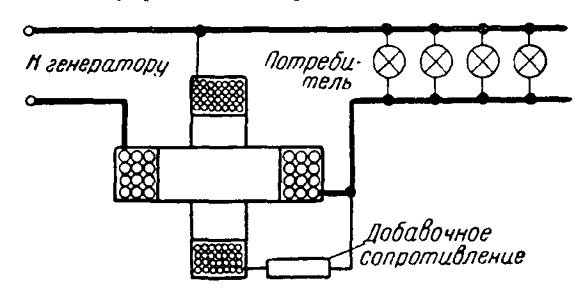


Рис. 3-29. Измерение мощности электродинамическим прибором.

На рисунке показан разрез катушек — неподвижной (с толстыми проводами) и подвижной (с тонкими проводами); эти катушки подобны изображенным на рис. 3-25 Неподвижная катушка включена в рассечку проводов линии передачи энергии; через нее проходит весь ток, сопротивление этой катушки очень мало Подвижная катушка через большое добавочное сопротивление подключена к проводам линии так, как включается вольтметр. Отклонение (поворот) подвижной катушки пропорционален произведению тока и напряжению линии. Таким образом, прибор показывает передаваемую по линии мощность.

тем же напряжением, что и лампы. Добавочное сопротивление в цепи этой обмотки уменьшает величину проходящего через нее тока.

Ток нагрузки, проходя по обмотке тока, создает вокруг нее магнитное поле. Магнитная индукция этого поля будет тем больше, чем больше величина тока нагрузки.

Поле обмотки тока действует на находящуюся в нем обмотку напряжения. Величина силы будет тем больше, чем больше магнитная индукция этого поля и чем больший ток проходит по обмотке напряжения.

Сила взаимодействия между обмотками пропорциональна произведению токов. Она тем больше, чем больше величина каждого из двух токов, чем больше их произведение.

Но величина тока в обмотке напряжения тем больше, чем больше напряжение на ее концах, т. е. чем больше напряжение сети. Значит, показание прибора зависит от произведения величин тока и напряжения.

Мы знаем, что произведение величин тока и напряжения равно электрической мощности (§ 2-6 и 2-12). Значит, при включении электродинамического прибора по схеме рис. 3-29 он будет показывать величину потребляемой в сети мощности. Такие приборы называются ваттметрами.

Пример 4. Измерения, произведенные при исследовании электродинамического ваттметра, позволили установить такую формулу:

$$N = 1\,000 \cdot I_1 \cdot I_2;$$

здесь N — число делений шкалы, против которого устанавливается стрелка;

I_1 — ток в неподвижной катушке;

I_2 — ток в подвижной катушке, включаемой через добавочное сопротивление к сети (рис. 3-29).

Сопротивление цепи подвижной обмотки $r = 5\,000$ *ом* (вместе с добавочным сопротивлением).

Спрашивается, скольким ваттам передаваемой мощности соответствует одно деление шкалы, если ваттметр включен по схеме, показанной на рис. 3-29?

Решение. Ответить на поставленный вопрос нетрудно. Для этого выразим ток подвижной катушки I_2 через напряжение и через сопротивление

$$I_2 = \frac{U}{r} = \frac{U}{5\,000}.$$

Подставим это выражение тока в формулу для числа делений шкалы

$$N = 1\,000 \cdot I_1 \frac{U}{5\,000} = 0{,}2 \cdot I_1 \cdot U.$$

Но $I_1 \cdot U$ это и есть мощность P, которую нужно измерить.

Очевидно, что когда $P = I_1 \cdot U = 5$ *вт*, число делений шкалы

$$N = 0{,}2 \cdot 5 = 1.$$

А это значит, что *пяти ваттам соответствует одно деление.*

Если на шкале ваттметра всего 100 делений, значит, предельная мощность, которую можно измерить таким ваттметром, составляет 500 *вт*.

Вопрос. Сколько делений покажет стрелка нашего ваттметра, если ток $I_1 = 2{,}5$ *а*, а напряжение $U = 120$ *в*?

Ответ. По формуле

$$N = 0{,}2 \cdot I_1 \cdot U$$

находим

$$N = 0{,}2 \cdot 2{,}5 \cdot 120 = 60 \text{ делений}.$$

Но цена каждого деления 5 *вт*, значит, прибор показывает 300 *вт*, что и соответствует действительной мощности:

$$P = 2{,}5\ a \cdot 120\ в = 300\ вт.$$

3-9. ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЗДАЕТ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩУЮ СИЛУ

В первой четверти прошлого столетия получили распространение первые электрохимические источники тока. Их появление привело к ряду важных открытий. К их числу относятся: открытие электрической дуги В. Петровым (см. § 2-2); открытие магнитных проявлений тока—электрический ток способен вызвать отклонение магнитной стрелки (Эрстед—Дания); провода с электрическим током взаимно отталкиваются или притягиваются (Ампер—Франция).

Ряд этих открытий завершился знаменитым опытом Фарадея (Англия, 1831), значение которого для развития электротехники было исключительно большим.

Проведение опыта Фарадея схематически показано на рис. 3-30—3-35. В таком виде его нетрудно осуществить.

На трубке из плотного картона нанесены две обмотки. Первая из них может соединяться с источником тока, например с аккумулятором. Вторая обмотка изолирована от первой, т. е. между этими обмотками нет электрического соединения (нет контакта). Цепь второй обмотки замкнута на магнитоэлектрический прибор.

Самое существенное в постановке опыта заключается в следующем: вторая обмотка находится в магнитном поле первой, конечно, когда по первой обмотке проходит электрический ток. Фарадей искал ответа на вопрос:

не вызывает ли магнитное поле первой обмотки возникновение электрического тока во второй?

Для того чтобы получить ответ на этот вопрос, в цепь второй обмотки и включен чувствительный амперметр (гальванометр).

Картина, изображенная на рис. 3-30, дает, казалось бы, отрицательный ответ.

Магнитное поле изменяется включением и выключением тока. Но проведем более тщательно наши наблюдения, сосредоточив внимание на стрелке амперметра как раз в то время, когда цепь первой обмотки разрывается (рис. 3-31) или, наоборот, замыкается (рис. 3-32). В этом случае можно заметить, что при разрыве цепи первой обмотки во второй обмотке возникает ток. Этот ток длится недолго— стрелка слегка отклонится вправо и вновь вернется в нулевое положение (рис. 3-31).

Точно так же можно заметить возникновение тока во второй обмотке при включении тока в цепь первой обмотки (рис. 3-32).

И этот ток длится недолго—стрелка слегка отклонится влево и вновь вернется в исходное (нулевое) положение.

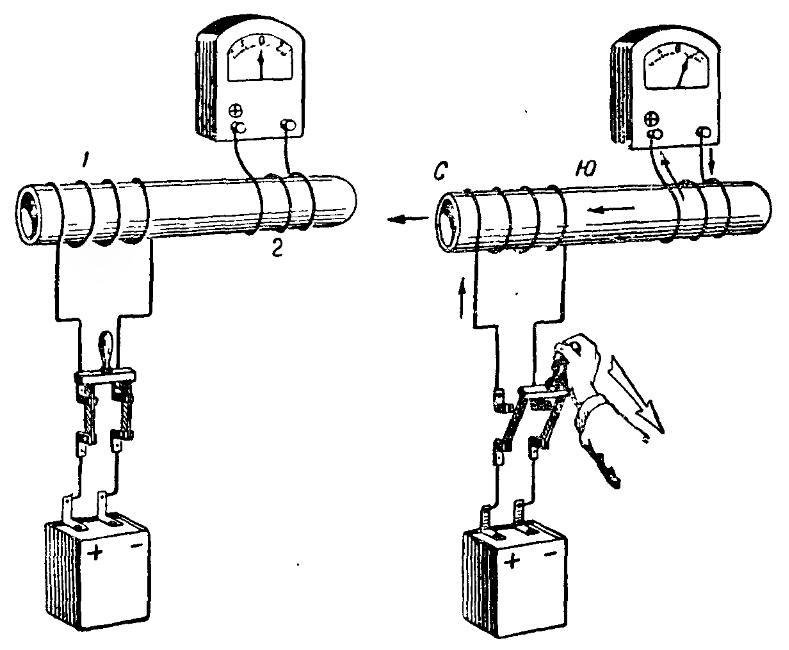


Рис. 3-30. Опыт Фарадея.

В первой обмотке проходит ток (цепь аккумулятора замкнута). Вторая обмотка находится в магнитном поле первой обмотки. Несмотря на это, тока в цепи второй обмотки нет: стрелка амперметра стоит на нуле.

Рис. 3-31. Опыт Фарадея.

Ток первой обмотки разрывается. Магнитное поле, в котором находится вторая обмотка, изменяется (оно исчезает). Стрелка амперметра, включенного в цепь второй обмотки, слегка отбрасывается вправо и быстро возвращается в исходное (нулевое) положение. Под действием изменяющегося магнитного поля возникает ток.

В чем же различие между первым наблюдением (рис. 3-30) и двумя последующими?

В первом наблюдении мы имели дело с неизменным током в первой обмотке, а следовательно, и с неизменным магнитным полем.

Электрический ток может возникать в замкнутой цепи, если ее провода находятся в изменяющемся магнитном поле.

Но если в цепи проводов возникает ток, значит, в цепи действует э. д. с. (вспомним второй закон Кирхгофа, § 2-20 и 2-25).

Другими словами:

в проводах электрической цепи при изменении магнитного поля возникает (наводится) э. д. с.[1].

Магнитное поле изменяется введением стали. Магнитное поле можно изменять не только посредством изменения тока Мы знаем, что внесение железа усиливает поле. Значит, если внутрь нашей картонной трубы внести пакет из стальных пластин (рис. 3-33), магнитное поле, создаваемое первой катушкой, усилится.

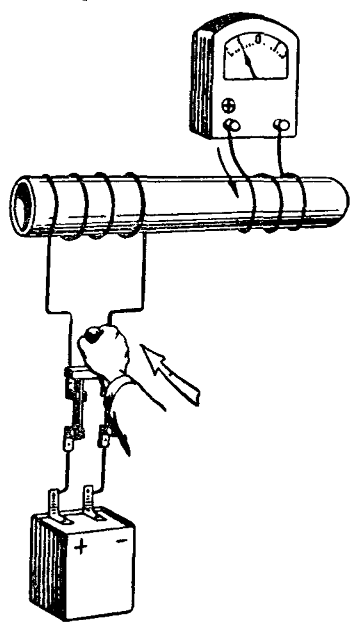


Рис. 3-32. Опыт Фарадея.

Производится включение тока в цепи первой обмотки. Магнитное поле, в котором находится вторая обмотка, изменяется (поле возникает). Стрелка амперметра, включенного в цепь второй обмотки, слегка отбрасывается влево и быстро возвращается в исходное (нулевое) положение. Под действием изменяющегося магнитного поля возникает ток.

Возникает ли э. д. с. во второй обмотке при вдвигании пакета?

Опыт дает утвердительный ответ (рис. 3-33). Обратим внимание на то, что при вдвигании стали стрелка прибора отклоняется в ту же сторону, что и при включении тока.

При выдергивании стального пакета стрелка отклоняется в ту же сторону, что и при выключении тока (в обоих случаях магнитное поле уменьшается).

Магнитное поле изменяется из-за перемещения самой катушки. Рассмотрим еще один опыт, проведение которого показано на рис. 3-34. Магнитное поле создается обмоткой со стальным сердечником. Ток в обмотке поддерживается аккумулятором. Вторая обмотка намотана на независимый картонный каркас (картонное кольцо). Эта обмотка замкнута через гибкий шнур на измерительный прибор и не имеет никакого электрического соединения с цепью первой обмотки.

[1] Описанное здесь явление, открытое Фарадеем, называют: наведение э. д. с. магнитным полем или электромагнитная индукция.

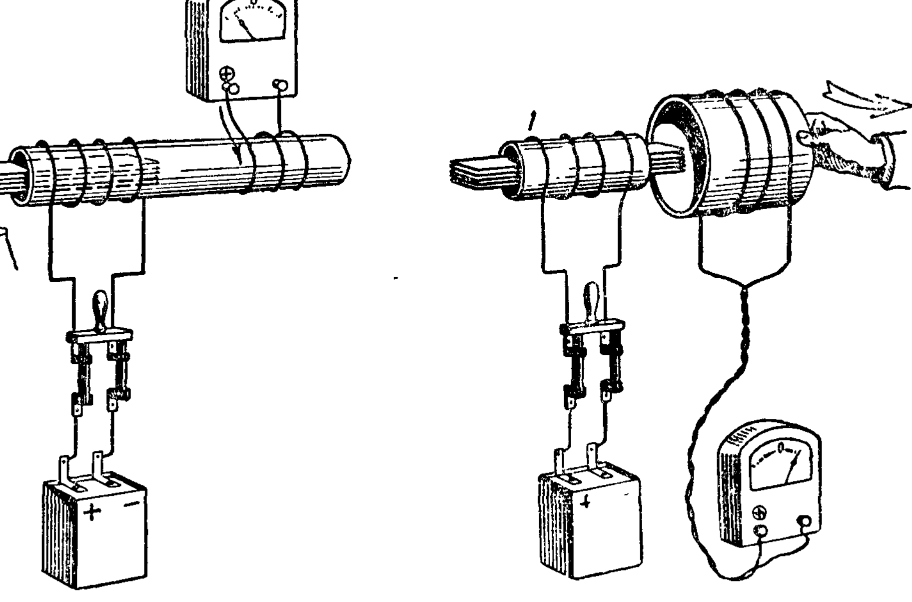


Рис. 3-33. При вдвигании пакета стальных пластин магнитное поле усиливается. Стрелка амперметра, включенного в цепь второй обмотки, отклоняется влево, как это наблюдается и при включении тока (ср. рис. 3-32).

Рис. 3-34. Во второй обмотке наводится э. д. с. при ее удалении из магнитного поля первой обмотки.

В цепи второй обмотки возникает э. д. с., когда она удаляется из поля, создаваемого первой обмоткой.

Магнитное поле изменяется из-за перемещения постоянного магнита. Рассмотрим еще один опыт, понятие о котором дает рис. 3-35; при удалении стержневого магнита в неподвижной обмотке наводится э. д. с.

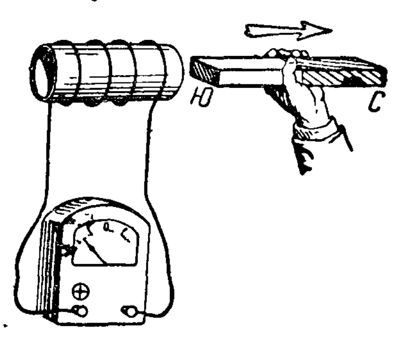


Рис. 3-35. При удалении стержневого магнита от обмотки, замкнутой на амперметр, в обмотке возникает э. д. с.

Этот опыт показывает, что э. д. с. действительно наводится именно изменением магнитного поля, а не взаимодействием токов, как могло бы казаться, например, из опытов, изображенных на рис. 3-31 и 3-32.

Дальнейшие наблюдения позволили установить много новых фактов, которые, в конце концов, удалось обобщить и установить важные общие законы.

3-10. ЗАКОН ЛЕНЦА

Русский академик Э. Х. Ленц установил уже в 1834 г. свой знаменитый закон, позволяющий легко определить направление э. д. с., наводимой магнитным полем:

наводимая э. д. с. всегда направлена так, чтобы создавать ток, противодействующий происходящим изменениям.

Поясним примерами.

Примечание. Направление магнитного поля, создаваемого токами обмоток, во всех примерах определяется по правилу штопора (см. § 3-2, рис. 3-12, 3-13).

Пример 1. В первой обмотке ток нарастает и создает магнитное поле, направление которого показано стрелкой *1* (рис. 3-36а). Электродвижущая сила, наводимая во второй обмотке, создает в ней ток. Магнитное поле тока второй обмотки по закону Ленца должно быть направлено навстречу нарастающему магнитному полю первой обмотки. Магнитное поле наведенного тока противодействует нарастанию поля.

Сопоставьте сказанное здесь с направлениями токов, показанными на рис 3-32.

Пример 2. В первой обмотке ток I_1 уменьшается, соответственно ослабевает и магнитное поле, направление которого показано стрелкой *1* (рис. 3-36б). Электродвижущая сила, наводимая во второй обмотке,

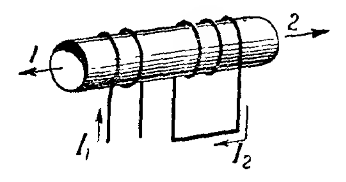


Рис. 3-36а. Ток I_1 нарастает.

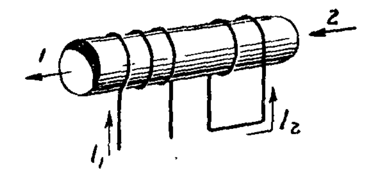


Рис. 3-36б. Ток I_1 уменьшается.

создает в ней ток I_2. Магнитное поле тока второй обмотки по закону Ленца должно быть направлено одинаково с магнитным полем первой обмотки. Магнитное поле наведенного тока поддерживает убывающее поле, другими словами, оно противодействует происходящему изменению.

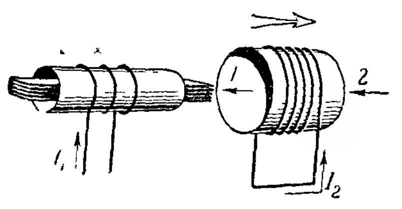


Рис. 3-36в. Ток I_1 не меняется. Вторая катушка отодвигается.

Сопоставьте сказанное здесь с направлением токов, показанным на рис. 3-31.

Пример 3. Обмотка, образующая замкнутую цепь, удаляется из магнитного поля другой (первой) обмотки, соединенной с источником тока. Направление магнитного поля неподвижной обмотки показано стрелкой *1* (рис. 3-36в) Электродвижущая сила, наводимая во второй обмотке, создает в ней ток. Магнитное поле второй обмотки по закону Ленца должно быть направлено одинаково с полем первой обмотки Магнитное поле, исчезающее во второй обмотке из-за того, что она удаляется, поддерживается током, наведенным во второй обмотке.

Пример 4. Самостоятельно убедитесь в том, что направление тока, наведенного во второй обмотке, в условиях опыта, изображенного на рис. 3-33, соответствует закону Ленца.

3-11. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Для того чтобы уяснить смысл нового для нас понятия «магнитный поток», подробно разберем несколько опытов с наведением э. д. с., обращая внимание на количественную сторону производимых наблюдений.

В наших опытах мы будем пользоваться установкой, изображенной на рис. 3-37.

Она состоит из большой многовитковой катушки, намотанной, скажем, на трубу из плотного, проклеенного картона. Питание катушки производится от аккумулятора через рубильник и сопротивление, поддающееся регулированию. О величине тока, устанавливающегося в катушке, можно судить по амперметру (на рис. 3-37 не показан).

Внутри большой катушки может устанавливаться дру-

гая маленькая катушка, концы которой подведены к магнитоэлектрическому прибору—гальванометру.

Для наглядности рисунка часть катушки показана вырезанной—это позволяет изобразить расположение маленькой катушки.

При замыкании или размыкании рубильника в маленькой катушке наводится э. д. с., и стрелка гальванометра на короткое время отбрасывается из нулевого положения.

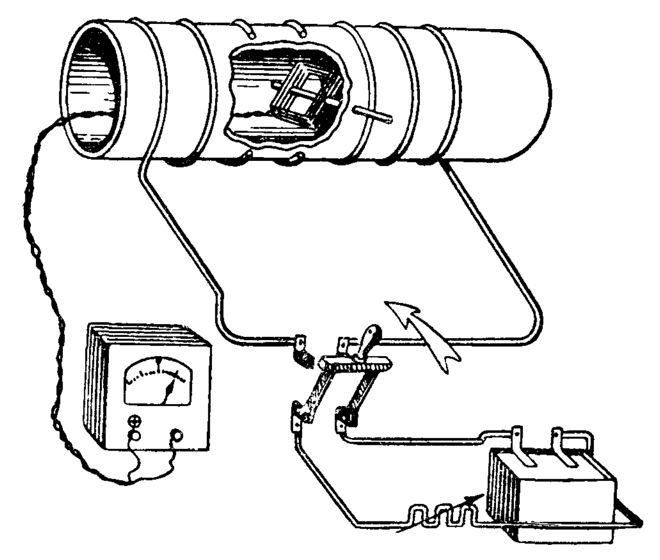


Рис. 3-37. Устройство, на котором можно изучать наведение э. д. с. изменяющимся магнитным полем.

По величине отброса можно судить о том, в каком случае наведенная э. д. с. больше, в каком она меньше. Замечая число делений, на какое отбрасывается стрелка, можно количественно сравнивать действие, производимое наведенными э. д. с. [1].

Первое наблюдение. Вставив внутрь большой катушки маленькую, закрепим ее и пока не будем ничего изменять в их расположении.

---

[1] Заметим, что в лаборатории обычно пользуются зеркальным гальванометром, а не стрелочным. При этом выбирают гальванометры медленно раскачивающиеся — колебание зеркальца и рамки, выведенной из равновесия (налево, направо и обратно налево), длится 10—20 *сек.* При этом очень легко отсчитать крайнее положение светового указателя (зайчика).

Включим рубильник и, меняя сопротивление, включенное вслед за аккумулятором, установим определенное значение тока, например:

$$I = 1\ a.$$

Произведем теперь выключение рубильника, наблюдая за гальванометром. Пусть его отброс N окажется равным 5 делениям вправо:

$N = 5$, когда выключается ток 1 *а*.

Снова включим рубильник и, меняя сопротивление, увеличим ток большой катушки до 4 *а*.

Дадим гальванометру успокоиться, и снова выключим рубильник, наблюдая за гальванометром.

Если его отброс составлял 5 делений при выключении тока 1 *а*, то теперь при выключении 4 *а* мы заметим, что отброс увеличился в 4 раза:

$N = 20$, когда выключается ток 4 *а*.

Продолжая такие наблюдения, легко заключить, что отброс гальванометра, а значит, и наведенная э. д. с. возрастают пропорционально росту отключаемого тока.

Но мы знаем, что изменение тока вызывает изменение магнитного поля (его индукции), поэтому правильный вывод из нашего наблюдения такой:

наводимая э. д. с. пропорциональна скорости изменения магнитной индукции.

Более подробные наблюдения подтверждают правильность этого вывода.

Второе наблюдение. Продолжим наблюдение за отбросом гальванометра, производя выключение одного и того же тока, скажем $I = 4\ a$. Но будем изменять число витков w маленькой катушки, оставляя неизменными ее расположение и размеры.

Предположим, что отброс гальванометра

$$N = 20$$

[1] Включение рубильника должно сопровождаться отбросом гальванометра на 5 делений влево (сообразите сами, почему). А потом во время регулировки тока стрелка гальванометра отклонялась каждый раз, когда менялся ток — ведь изменение тока сопровождается изменением магнитного поля, а значит, и наведением э. д. с. в маленькой катушке.

наблюдался нами при $w = 100$ (сто витков на малой катушке).

Как изменится отброс гальванометра, если удвоить число витков?

Опыт показывает, что

$$N = 40 \text{ при } w = 200.$$

Именно этого и следовало ожидать.

В самом деле, все витки маленькой катушки находятся под одинаковым воздействием магнитного поля и в каждом витке должна наводиться одинаковая э. д. с.

Назовем э. д. с. одного витка буквой $Э_1$, тогда э. д. с. 100 витков, включенных последовательно один за другим, должна быть в 100 раз больше

$$Э = 100\,Э_1.$$

При 200 витках

$$Э = 200\,Э_1.$$

При любом ином числе витков w

$$Э = wЭ_1.$$

Если э. д. с. возрастает пропорционально числу витков, то само собой разумеется и то, что отброс гальванометра должен быть тоже пропорционален числу витков.

Это и показывает опыт. Итак,

наводимая э. д. с. пропорциональна числу витков.

Еще раз подчеркиваем, что размеры маленькой катушки и ее расположение во время нашего опыта оставались неизменными. Само собой разумеется, что опыт проводился в одной и той же большой катушке при выключении того же тока.

Третье наблюдение. Проделав несколько опытов с одной и той же маленькой катушкой при неизменности включаемого тока, легко убедиться в том, что величина наводимой э. д. с. зависит от того, как расположена маленькая катушка.

Для наблюдения зависимости наводимой э. д. с. от положения маленькой катушки усовершенствуем несколько нашу установку (рис. 3-38).

К выходящему наружу концу оси маленькой катушки приделаем указательную стрелку и круг с делениями (вро-

9*

де тех, которые можно встретить на радиоприемниках). Повертывая стерженек, мы теперь по положению указательной стрелки можем судить о том положении, которое занимает маленькая катушка внутри большой.

Наблюдения показывают, что

> *наибольшая э. д. с. наводится тогда, когда ось маленькой катушки совпадает с направлением магнитного поля.*

Другими словами, когда оси большой и малой катушек параллельны.

Такое расположение маленькой катушки показано на рис. 3-39, *А* и *Б*. По мере поворота катушки наводимая в ней э. д. с. будет все меньше и меньше.

Наконец, если плоскость маленькой катушки станет параллельной линиям поля, в ней не будет наводиться никакой э, д. с. Может возникнуть вопрос, что же будет при дальнейшем повороте маленькой катушки?

Если мы повернем катушку больше чем на 90° (относительно исходного положения), то изменится знак наводи-

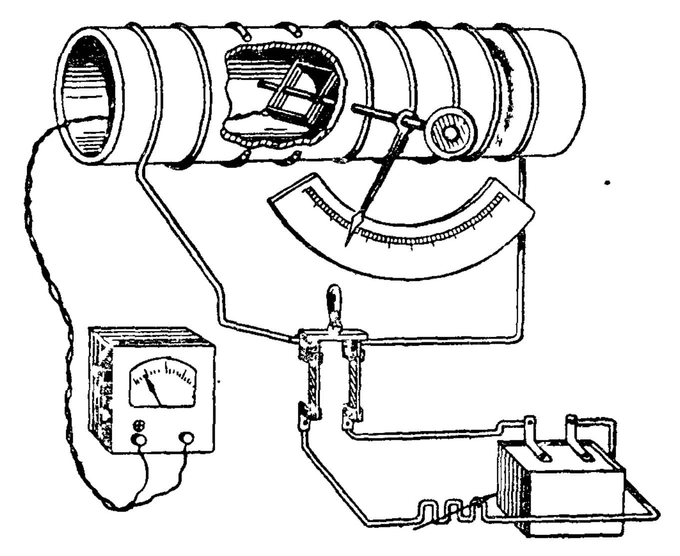


Рис. 3-38. Устройство для поворачивания маленькой катушки, закрепленной на стерженьке, пропущенном через стенки большой катушки. Стерженек связан с указательной стрелкой. Положение стрелки на полукольце с делениями показывает, как расположена маленькая катушка.

мой э. д. с. Линии поля будут входить в катушку с другой стороны.

Четвертое наблюдение. Важно провести еще одно, заключительное, наблюдение.

Выберем определенное положение, в которое будем ставить маленькую катушку.

Условимся, например, ставить ее всегда в такое положение, чтобы наводимая э. д. с. была возможно большой

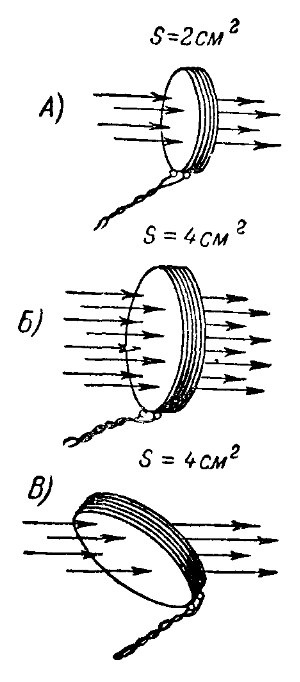


Рис. 3-39. К выводу понятия „Магнитный поток".

Магнитное поле $B = 2\,000$ *гс* изображено линиями, проведенными из расчета две линии на 1 *см*²,

А — катушка площадью 2 *см*² расположена перпендикулярно направлению поля.

С каждым витком катушки сцеплен магнитный поток $\Phi = 2$ *см*² 2 тыс *гс* = 4 тыс. *мкс* (максвеллов). Этот поток изображен четырьмя линиями пересекающими катушку;

Б — катушка площадью 4 *см*² расположена перпендикулярно направлению поля.

С каждым витком катушки сцеплен магнитный поток $\Phi = 4$ *см*² 2 тыс. *гс* = 4 тыс. *мкс*. Этот поток изображен восемью линиями, пересекающими катушку;

В — катушка площадью 4 *см*² расположена наклонно. Магнитный поток, сцепленный с каждым из ее витков, изображен четырьмя линиями Он равен $\Phi = 4$ тыс. *мкс*, так как каждая линия изображает, как это видно из рис *А* и *Б*, поток в 1 тыс. *мкс*. Поток, сцепленный с катушкой, уменьшился из-за ее наклона.

(конечно, при данном числе витков и данном значении отключаемого тока). Изготовим несколько маленьких катушек разного диаметра, но с одинаковым числом витков.

Будем ставить эти катушки в одно и то же положение и, выключая ток, будем наблюдать за отбросом гальванометра.

Опыт покажет нам, что

наводимая э. д. с. пропорциональна площади поперечного сечения катушек.

Магнитный поток. Все наблюдения позволяют нам сделать вывод о том, что

наводимая э. д. с. всегда пропорциональна изменению магнитного потока.

Но что такое магнитный поток?

Сначала будем говорить о магнитном потоке через плоскую площадку S, образующую прямой угол с направлением магнитного поля. В этом случае магнитный поток равен произведению площади на индукцию или

$$\Phi = S \cdot B;$$

здесь S — площадь нашей площадки, *см*^{2};
B — индукция, *гс*;
Φ — магнитный поток, максвелл (*мкс*).

Единицей потока служит максвелл.

Изображая магнитное поле посредством линий, мы можем сказать, что

магнитный поток пропорционален числу линий, пронизывающих площадку.

Если бы линии поля были проведены так, что число их на 1 *см*^{2} поперечно поставленной плоскости равнялось индукции поля B, выраженной в гауссах, то можно было бы прямо сказать, что

поток равен числу таких (единичных) линий.

Если линии поля проведены так, что число их на 1 *см*^{2} поперечно поставленной плоскости равняется индукции поля B, выраженной в тысячах *гаусс*, то

поток равен числу таких линий, умноженных на тысячу.

На рис. 3-39 магнитное поле в 2 000 *гс* изображено линиями, проведенными из расчета двух линий на 1 *см*^{2}. Поэтому в случае A магнитный поток через поперечную к полю площадку в 2 *см*^{2} равен

$$\Phi = 2\,000\ гс \cdot 2\ см^2 = 4\,000\ мкс$$

или 4 линиям, умноженным на тысячу.

В случае $Б$, на том же рис. 3-39, магнитный поток через поперечную площадку в 4 *см*^{2} при индукции 2 000 *гс* равен:

$$\Phi = 2\,000\ гс \cdot 4\ см^2 = 8\,000\ мкс$$

или 8 линиям, умноженным на тысячу.

Можно было бы сказать и так: магнитный поток равен 8 000 единичных линий.

Магнитный поток, сцепленный с витком. Говоря о наведенной э. д. с., нам нужно иметь в виду поток, сцепленный с витком.

Поток, сцепленный с витком, это поток, пронизывающий поверхность, окаймленную витком.

На рис. 3-39 поток, сцепленный с каждым витком катушки, в случае *А* равен 4 000 *мкс*, а в случае *Б* поток равен 8 000 *мкс*.

Если площадка не поперечна, а наклонена к магнитным линиям, то уже нельзя определять поток просто произведением площади на индукцию. Поток в этом случае определяется как произведение индукции на площадь проекции нашей площадки. Речь идет о проекции на плоскость, перпендикулярную линиям поля, или как бы о тени, отбрасываемой площадкой (рис. 3-40).

Рис. 3-40. К выводу проекции площадки.

Проводя опыты более подробно и объединяя наши третье и четвертое наблюдения, можно было бы сделать такой вывод: наводимая э. д. с. пропорциональна площади той тени, которую отбрасывает наша маленькая катушка на плоскость, перпендикулярную линиям поля, если бы она была освещена лучами света, параллельными линиям поля. Такая тень называется проекцией.

Однако при любой форме площадки поток по-прежнему пропорционален числу линий, проходящих через нее, или равен числу единичных линий, пронизывающих площадку.

Так, в случае *В* на рис. 3-39 поток через площадку в 4 $см^2$ при индукции 2 000 *гс* равен всего 4 000 *мкс* (4 линии ценой по 1 000 *мкс*).

Изображение магнитного поля линиями очень помогает при определении потока.

Если с каждым из w витков катушки сцеплен поток Φ, можно назвать произведение $w\Phi$ полным потокосцеплением катушки. Понятием потокосцепления особенно удобно пользоваться, когда с разными витками сцеплены разные потоки. В этом случае полным потокосцепле-

нием называют сумму потоков, сцепленных с каждым из витков.

Несколько замечаний о слове «поток». Почему мы говорим о потоке? Связано ли с этим словом представление о каком-то течении чего-то магнитного? В самом деле, говоря «электрический ток», мы представляем себе движение (поток) электрических зарядов. Также ли обстоит дело и в случае магнитного потока?

Нет, когда мы говорим «магнитный поток», мы имеем в виду только определенную меру магнитного поля (произведение силы поля на площадь), похожую на меру, которой пользуются инженеры и ученые, изучающие движение жидкостей. При движении воды они называют ее потоком произведение из скорости воды на площадь поперечно расположенной площадки (поток воды в трубе равен ее скорости на площадь поперечного сечения трубы).

Конечно, само магнитное поле, представляющее собой один из видов материи, связано и с особой формой движения. У нас еще нет достаточно отчетливых представлений и знаний о характере этого движения, хотя о свойствах магнитного поля современным ученым известно многое: магнитное поле связано с существованием особой формы энергии, его основной мерой является индукция, другой очень важной мерой является магнитный поток.

3-12. ЗАКОН НАВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

Все опыты с наведением э. д. с., а также теоретические рассуждения приводят к тому, что:

э. д. с., наводимая в электрической цепи, равна скорости изменения потока, сцепленного с ней.

Выразим сказанное математической формулой. Для этого введем один новый знак Δ или d. Первый из них — это греческая буква «*де*» (читается дельта), второй — это просто латинская буква d. Каждая из этих букв, поставленная перед обозначением какой-нибудь величины, выражает ее изменение. Так, например, если время обозначить буквой t, то Δt выражает изменение времени или промежуток времени. Если через s обозначить путь, то Δs обозначает отрезок пути или пройденный путь. В таком случае отношение $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ выражает скорость v

$$\frac{\textit{пройденный путь}}{\textit{время}} = \textit{скорость}$$

или

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = v.$$

Пусть за промежуток времени Δt магнитный поток, сцепленный с витком, равномерно изменяется на $\Delta\Phi$. В таком случае скорость изменения потока можно обозначить отношением $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Это отношение и равно наводимой э. д. с.

$$Э = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Эта формула представляет собой математическое выражение одного из важнейших электротехнических законов.

Направление э. д. с. всегда может быть определено по закону Ленца.

О единицах магнитного потока и э. д. с. Пусть, например за 0,01 *сек* (Δt=0,01 *сек*) поток, сцепленный с витком, равномерно возрастая, изменился на 20 000 максвеллов ($\Delta\Phi$=20 000 *мкс*), значит, за это время в витке наводилась э. д. с.

$$Э = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{20\,000\ мкс}{0{,}01\ сек} = 2\,000\,000.$$

Электродвижущая сила равняется 2 млн. Все верно, но только здесь э. д. с. выражена в незнакомых нам единицах: э. д. с. равняется $2 \cdot 10^6$ (2 млн.) незнакомых единиц, а не $2 \cdot 10^6$ *в*. Эти единицы для выражения э. д. с. были введены около 70 лет назад одновременно с единицами гаусс и максвелл для магнитной индукции и для магнитного потока. Физики и сейчас часто пользуются этими единицами, поэтому будем их здесь называть физическими[1]. Но физические единицы для индукции и потока достаточно удобны и на практике ими пользуются очень часто. Напротив, физическая единица для напряжения практически неприемлема и вместо нее была введена единица 1 *в*, равная 100 млн. физических единиц:

$$1\ в = 10^8\ физ.\ ед.\ э.\ д.\ с.$$

Поэтому, если мы хотим выражать э. д. с. в вольтах, а магнитный поток в максвеллах, то мы должны

[1] Их полное наименование — единицы магнитной системы: сантиметр, грамм, секунда.

в формулу закона наведения э. д. с. ввести множитель 10^{-8}:

$$Э(в) = 10^{-8} \frac{\Delta\Phi\ (мкс)}{\Delta t\ (сек)}.$$

Пример 1. Виток площадью 4 *см*² находится в магнитном поле. Сила поля (индукция) возрастает с нуля до 2 000 *гс* за 0,05 *сек*.

Плоскость витка образует угол 90° с направлением поля. Чему равна э. д. с., наводимая в витке?

Решение. Поток, сцепленный с витком, достигает значения

$$\Phi = B \cdot S = 2\,000\ гс \cdot 4\ см^2 = 8\,000\ мкс$$

за 0,05 *сек*, значит, $\Delta\Phi = 8\,000$ *мкс* (поток начал возрастать с нуля) и $\Delta t = 0{,}05$ *сек*.

Наводимая э. д. с.

$$Э = 10^{-8} \frac{8\,000\ мкс}{0{,}05\ сек} = 1{,}6 \cdot 10^{-3}\ в$$

или 1,6 *мв* (милливольт).

Пример 2. Катушка состоит из 500 витков

$$w = 500.$$

Каждый из витков сцеплен с магнитным потоком, возрастающим на $\Delta\Phi = 8\,000$ *мкс* за время $\Delta t = 0{,}05$ *сек*. Чему равна э. д. с., наводимая во всей катушке?

Решение. В каждом из витков наводится э. д. с., равная 1,6 *мв* (см. предыдущий пример). Значит, во всей катушке наводится э. д. с.

$$Э = 10^{-8} w \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 500 \cdot 1{,}6 = 0{,}8\ в.$$

Пример 3. Катушка состоит из 200 витков. Площадь каждого витка 400 *см*². Магнитная индукция направлена вдоль оси катушки и равномерно возрастает с 5 000 до 12 000 *гс* за время 0,01 *сек*.

Чему равна э. д. с., наводимая в катушке?

Решение. В каждом витке поток изменяется на

$$\Delta\Phi = S(B_2 - B_1) = 400\ см^2 (12\,000\ гс - 5\,000\ гс) = 2\,800\,000\ мкс$$

(два миллиона восемьсот тысяч максвелл) или 2 800 *кмкс* (две тысячи восемьсот киломаксвелл, т. е. тысяч максвелл).

Здесь через B_2 и B_1 обозначены новое значение индукции $B_2 = 12\,000$ *гс* и старое значение $B_1 = 5\,000$ *гс*, с которого началось возрастание поля.

Наводимая э. д. с.

$$Э = 10^{-8} w \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 10^{-8} \cdot 200 \frac{2\,800\,000\ мкс}{0{,}01\ сек} = 560\ в.$$

Пример 4. Виток площадью 500 *см*² расположен в магнитном поле так, что его ось образует угол 45° с направлением поля. Индукция магнитного поля, равная 800 *гс*, равномерно уменьшается до нуля за 0,1 *сек*.

Чему равна э. д. с., наводимая в витке?

Решение. Проведем 10 параллельных линий, отстоящих на одинаковом расстоянии одна от другой и пронизывающих виток, расположенный поперек поля (ось витка совпадает с направлением поля). Рядом нарисуем виток, наклонснный на угол 45° С, и сосчитаем, сколько линий пронижет наклоненный виток.

Из рисунка легко найти, что при наклоне витка его пронижет 7 линий вместо 10 (ср. рис. 3-39 и 3-40).

Но 10 линиям соответствовал поток

$$\Phi_{\perp} = B \cdot S = 800 \text{ гс} \cdot 500 \text{ см}^2 = 400\,000 \text{ мкс}.$$

Значит, 7 линиям соответствует поток

$$\Phi_{\angle 45^\circ} = \frac{7 \text{ линий}}{10 \text{ линий}} \Phi_{\perp} = 280\,000 \text{ мкс}.$$

Знаками $\perp$ и $\angle 45^\circ$ отмечены потоки при перпендикулярном расположении витка и при его расположении под углом 45°.

Дополнительные замечания о единицах магнитных измерений. Для того чтобы в законе наведения э. д. с.

$$Э = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

можно было э. д. с. выражать в вольтах, а поток в максвеллах, мы ввели множитель 10^{-8} (одна стомиллионная).

Но можно было бы поступить иначе — ввести новую единицу магнитного потока в 100 млн. более крупную, чем максвелл. В таком случае в левой части мы прямо получили бы э. д. с. в вольтах.

Такую единицу удобно назвать *вольт-секундой**

$$1 \text{ в} \cdot \text{сек (вольт-секунда)} = 10^8 \text{ мкс}$$

(сто миллионов максвелл) или

$$1 \text{ мкс} = 10^{-8} \text{ в} \cdot \text{сек}.$$

В правой части выражения для $Э$ в числителе стоит вольт-секунда, а в знаменателе — секунда. Секунду и секунду можно сократить.

После такого сокращения останется число, умноженное на вольты.

Возьмем числовые данные примера 3:

$$\Delta\Phi = 2\,800\,000 \text{ мкс} = 2\,800\,000 \cdot 10^{-8} \text{ в} \cdot \text{сек} = 0{,}028 \text{ в} \cdot \text{сек},$$

$$\Delta t = 0{,}01 \text{ сек}.$$

Вычислим э. д. с., наводимую в одном витке

$$Э = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{0{,}028 \text{ в} \cdot \text{сек}}{0{,}01 \text{ сек}} = 2{,}8 \text{ в}.$$

Установление новой единицы для потока влечет за собой новую единицу для магнитной индукции.

Формулу, определяющую магнитный поток

$$\Phi = B \cdot S,$$

* Для этой единицы применяется и другое название — вебер.

мы можем применить и для определения индукции B по потоку

$$B=\frac{\Phi}{S}.$$

Если Φ выражено в *в·сек*, а S в *см*², то новая единица для индукции определяется как отношение единицы потока к едиинице площади.

Если площадь S измерять в квадратных метрах (*м*²), то мы получим еще другую единицу индукции:

$$1\,\frac{в\cdot сек}{м^2}=10^4\ гс.$$

3-13. НАВЕДЕНИЕ Э. Д. С. В ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ПРОВОДНИКЕ, ДВИЖУЩЕМСЯ В ПОЛЕ

В современных машинах — генераторах — получение э. д. с. основано на только что рассмотренном законе. Однако в отличие от примеров предыдущего параграфа в электрических машинах изменение магнитного потока происходит вследствие движения проводника в магнитном поле.

Представим себе, что в узкой щели между полюсами большого электромагнита расположена часть жесткой прямоугольной рамки, согнутой из толстого провода (рис. 3-41 и 3-42). Эта рамка не совсем замкнута, и ее концы соединены с гибким шнуром. Шнур подведен к гальванометру. При движении рамки в направлении, указанном стрелкой, сцепленный с рамкой магнитный поток изменяется. При изменении магнитного потока наводится э. д. с. О величине э. д. с. можно судить по отклонению гальванометра.

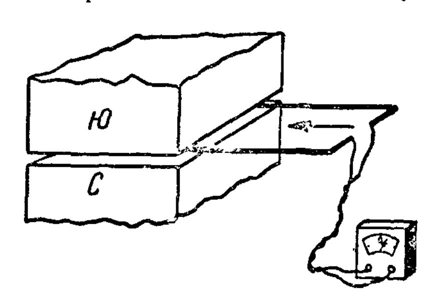


Рис. 3-41. Рамка из жесткого провода вдвигается в щель между полюсами электромагнита. Цепь рамки замкнута проводами, присоединенными к гальванометру.

На рис. 3-42 для большей ясности рисунка верхняя часть электромагнита (южный полюс) не показана вовсе. На том же рисунке магнитное поле изображено рядом маленьких стрелок. Поле между полюсами направлено

именно так, как показывают маленькие стрелки. В пространстве между полюсами поле обладает постоянной индукцией. По мере удаления от полюсов поле очень быстро ослабляется. Можно даже спокойно считать, что за пределами щели поле отсутствует.

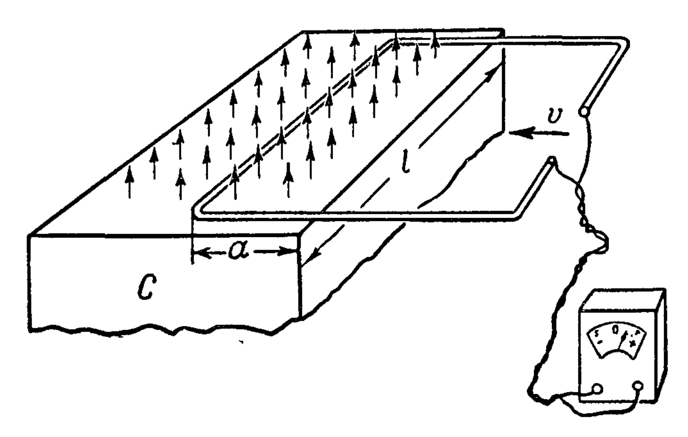


Рис. 3-42. То же, что на рис. 3-41, но для ясности рисунка верхняя часть электромагнита (южный полюс) не изображена. Стрелка v показывает направление движения рамки. Ширина рамки обозначена буквой l (эль). Размер a показывает, насколько глубоко рамка вдвинута в щель. Магнитное поле показано рядом стрелок.

Вычислим магнитный поток Ф, охватываемый рамкой. Для этого нужно умножить магнитную индукцию B на ту часть площади рамки, которая находится между полюсами. Если рамка имеет ширину l и вдвинута на глубину a (рис. 3-42), то площадь S, пронизываемая полем:

$$S = l \cdot a.$$

Сцепленный с рамкой магнитный поток

$$\Phi = B \cdot S = B \cdot l \cdot a.$$

Чем глубже вдвинута рамка, тем больше поток.

Пусть рамка доходит до середины ширины полюса, как это показано на рисунке. В таком случае сцепленный с нею поток изображается 16 линиями. Вдвинем рамку еще глубже, так, чтобы она доходила до $^3/_4$ ширины полюса. Тогда поток будет состоять уже из 24 линий. Когда рамка охватит весь полюс, поток увеличится до 32 линий.

Но чему равна скорость увеличения потока?

Она, конечно, зависит от той скорости, с какой рамка вдвигается в щель между полюсами.

Но можно и точнее определить скорость возрастания потока.

При движении рамки в формуле

$$\Phi = B \cdot l \cdot a$$

изменяется только размер a (глубина, на которую вдвинута рамка), значит, изменение потока $\Delta\Phi$ зависит от изменения именно этого размера a.

За промежуток времени Δt увеличение этого размера можно представить такой формулой:

$$\Delta a = v \cdot \Delta t,$$

где v — скорость, с которой движется рамка[1].

Но если мы знаем изменение размера a (т. е. Δa), то нетрудно подсчитать и соответствующее изменение потока ($\Delta\Phi$):

$$\Delta\Phi = B \cdot l \cdot \Delta a = B \cdot l \cdot v \cdot \Delta t.$$

Таким образом, мы почти закончили вывод формулы для наведенной э. д. с. Нам нужно только определить скорость изменения потока $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$. Деля левую и правую части последнего равенства на Δt, найдем:

$$Э = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B \cdot l \cdot v$$

или

$$э.\ д.\ с.\ (в) = 10^{-8} \cdot B\,(гс) \cdot l\,(см) \cdot v\,(см/сек).$$

Это и есть формула для вычисления э. д. с.,

наводимой в прямолинейном проводнике, движущемся в магнитном поле со скоростью v.

Выведенная формула справедлива, когда: 1) проводник расположен под прямым углом к направлению магнитного поля и к направлению скорости и когда 2) скорость (v) тоже образует прямой угол с направлением поля.

---

[1] Скорость определяется как путь, проходимый в единицу времени. Если скорость равна, например, 5 *см* в секунду, то через 1 *сек* пройденный путь составит 5 *см*, а через 0,1 *сек* пройденный путь составит 0,5 *см*.

Проделанные здесь выводы справедливы и в том случае, когда провод неподвижен, а движутся сами полюсы вместе с создаваемым ими магнитным полем.

Мы нашли формулу для движения рамки, а применили ее как формулу для э. д. с., наводимой в прямолинейном проводнике, движущемся поперек поля. Легко объяснить основания для этого: в боковых проводах, расположенных параллельно направлению скорости, никакой э. д. с. не наводится. Вся э. д. с. наводится в поперечном проводе длиной l, движущемся в магнитном поле.

В самом деле, если этот поперечный провод выйдет за пределы поля, то при дальнейшем движении рамки сцепленный с нею поток достигнет наибольшего значения (32 линии) и не будет изменяться. Конечно, только до тех пор, пока задняя сторона рамки не войдет в щель между полюсами. Значит, в боковых проводах (параллельных) никакой э. д. с. не наводится, даже когда они движутся в магнитном поле.

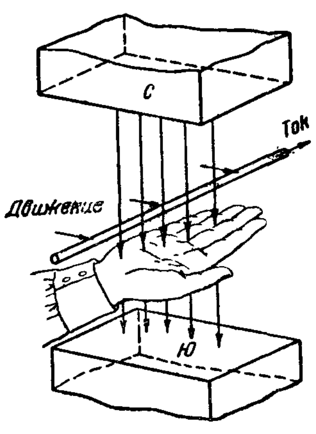


Рис. 3-43. Правило правой руки.

Правило правой руки. Направление э. д. с., наводимой при движении провода, можно определить, пользуясь правилом правой руки (рис. 3-43).

Если правая рука расположена так, что линии поля входят в ладонь, а отогнутый большой палец совпадает с направлением движения, то четыре вытянутых пальца показывают направление наводимой э. д. с.

Направление наводимой э. д. с. — это то направление, в котором под ее действием в замкнутой цепи должен протекать ток.

Легко убедиться в том, что правило правой руки полностью согласуется с законом Ленца. Предоставляем читателю самостоятельно убедиться в этом.

Пример 1. Между полюсами движется провод, как это показано на рис. 3-41 и 3-42. Магнитная индукция $B = 12\,000$ *гс*. Длина провода $l = 80$ *см*. Скорость $v = 50$ *м/сек* (или 5 000 *см/сек*).

Найти э. д. с., наводимую в проводе.

Решение. По формуле

$$Э = 10^{-8} \cdot B(гс) \cdot l\,(см)\,v\,(см/сек)$$

находим

$$Э = 10^{-8} \cdot 12\,000 \cdot 80 \cdot 5\,000 = 48\ в.$$

Конечно, такая э. д. с. наводится в проводе только в течение того промежутка времени, когда провод находится между полюсами.

Магнитные поля, скорости и размеры, подобные указанным в этом примере, можно встретить в электрических машинах.

3-14. ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ

В первых опытах (§ 3-9 и 3-11) с наведением (или индукцией) э. д. с. мы наблюдали наведение э. д. с. в одной цепи под действием изменения тока в другой. Но первая цепь ничем, по существу дела, не отличалась от второй; поэтому, изменяя ток во второй цепи, мы, конечно, обнаружили бы наведение э. д. с. в первой цепи.

Наведение э. д. с. в одной цепи, вызванное изменением тока в другой, называют взаимной индукцией (наведением).

Величина наводимой э. д. с. прямо пропорциональна скорости изменения тока.

Коэффициент пропорциональности между э. д. с., наводимой в первой цепи, и скоростью изменения тока во второй называют взаимной индуктивностью; его принято обозначать буквой M.

Единица для измерения индуктивности. Если скорость изменения тока выражать в амперах за секунду (*а/сек*), а э. д. с. в вольтах, то коэффициент пропорциональности между этими величинами M оказывается выраженным в единицах, носящих наименование *генри* (*гн*).

Если $M=1$ *гн*, то э. д с., наводимая в одной цепи изменением тока в другой, численно равна скорости изменения тока. Представим скорость изменения тока отношением $\Delta i : \Delta t$, где Δi — приращение тока, происшедшее за промежуток времени Δt.

Тогда все только что сказанное можно записать такой формулой

$$Э = M \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Явление взаимной индукции имеет очень большое значение в современной электротехнике.

На явлении взаимной индукции основана работа трансформаторов, о которых будет рассказано в гл. 11.

Пример 1. Взаимная индуктивность между двумя катушками равна 2 миллигенри (*мгн*), т. е. двум тысячным генри. Ток в первой катушке изменяется со скоростью 800 *а/сек*.

Чему равна э. д. с., наводимая во второй катушке?

Решение. Электродвижущая сила *Э* равна скорости изменения тока ($\Delta i/\Delta t$), умноженной на взаимную индуктивность *М*, или

$$Э = M\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0{,}002\ гн \cdot 800\ а/сек = 1{,}6\ в.$$

Пример 2. Если бы рядом с мощной линией передачи на протяжении целого километра проходила воздушная линия телефонной (или телеграфной) связи, то между ними существовала бы значительная индуктивная связь — магнитный поток, создаваемый током в линии передачи, пронизывал бы петлю проводов линии связи.

Для случая одного из подобных сближений двух линий взаимная индуктивность *М* была вычислена и оказалась равной $8 \cdot 10^{-5}$ *гн* (восьми стотысячным генри).

При коротком замыкании в линии передачи скорость нарастания тока $\left(\frac{\Delta i}{\Delta t}\right)$ может доходить до огромной величины $3 \cdot 10^{6}$ *а/сек* (3 млн. *а* за секунду).

Заметим, что такая скорость нарастания наблюдается при токе короткого замыкания, достигающем наибольшего значения порядка 10 000 *а*. При этом за одну тысячную долю секунды ($\Delta t = 0{,}001$ *сек*) ток может возрасти на 3 000 *а* ($\Delta i = 3\,000$ *а*).

Требуется найти, какой величины может достигнуть э. д. с. в линии связи при коротком замыкании в электрической линии передачи?

Решение

$$Э = M\frac{\Delta i}{\Delta t} = 8 \cdot 10^{-5}\ гн \cdot 3 \cdot 10^{6}\ а/сек = 240\ в.$$

Полученный ответ показывает со всей очевидностью необходимость отдаления линии связи от линии передачи или принятие других мер.

Отметим, что даже много меньшая наводка э. д. с. мешает хорошей работе связи.

Электродвижущая сила взаимоиндукции возникает потому, что с изменением тока связано изменение потока, как об этом уже говорилось (§ 3-9—3-12). Поэтому взаимную индуктивность *М* можно рассматривать

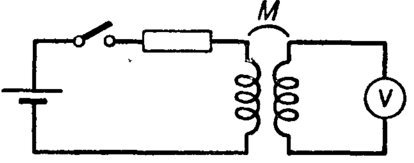


Рис. 3-44. Принятое обозначение индуктивной связи (взаимной индуктивности *М*) между первой и второй цепями.

и как коэффициент пропорциональности между током одной цепи и потоком, сцепленным с другой цепью.

На рис. 3-44 показано схематическое обозначение индуктивной связи двух цепей.

3-15. САМОИНДУКЦИЯ

Мы уже несколько раз рассматривали такой опыт.

В первой катушке изменяется ток. Изменение тока первой катушки сопровождается изменением потока, сцепленного со второй катушкой. Изменение этого потока создает э. д. с. во второй катушке.

Пора задать вопрос, почему мы говорили только о второй катушке. Ведь, казалось бы, изменение первого тока должно вызывать изменение потока не только во второй катушке, а и в первой (и даже прежде всего в первой). Не должна ли наводиться (индуктироваться) э. д. с. и в самой той обмотке, в которой изменяется ток?

Да, конечно, во всякой цепи при изменении в ней тока возникает э. д. с., вызванная изменением магнитного потока, сопровождающим изменение тока.

Когда изменение тока наводит э. д. с. в той самой цепи, в которой ток изменяется, тогда говорят о собственной индукции или о самоиндукции (т. е. о самонаведении).

В тех случаях, когда с протеканием тока связан большой магнитный поток (например, многовитковая катушка со стальным сердечником), явление самоиндукции выступает очень отчетливо.

Вероятно, каждому приходилось наблюдать большую искру (или дугу), сопровождающую отключение катушки со стальным сердечником (например, отключение обмотки электромагнита или обмотки возбуждения электрических машин постоянного тока).

Откуда возникает большое напряжение, способное зажигать эту дугу между расходящимися контактами рубильника? Это напряжение создается э. д. с. самоиндукции: при выключении рубильника ток начинает быстро уменьшаться; уменьшение тока сопровождается уменьшением магнитного потока, а быстрое изменение потока способно создавать большую э. д. с.

Собственная индуктивность. Электродвижущая сила самоиндукции *Э* пропорциональна скорости изменения тока

($\Delta i/\Delta t$); коэффициент (множитель) пропорциональности между скоростью изменения тока и э. д. с., наводимой током в своей собственной цепи, называется собственной инуктивностью цепи.

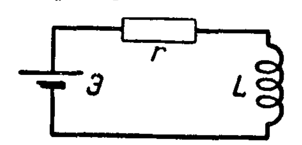


Рис. 3-45. Принятое обозначение собственной индуктивности электрической цепи L.

Этот коэффициент обозначают буквой L (эль), он выражается в генри, если единицами для остальных величин служат вольты, амперы и секунды.

Сказанное здесь выражается такой математической формулой:

$$Э = L\frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Собственная индуктивность цепи обозначается на схеме подобием катушки (рис. 3-45).

Пример 1. Собственная индуктивность многовитковой катушки о стальным сердечником составляет:

$$L = 20 \text{ гн}.$$

Через катушку протекает ток 10 *а*. Спрашивается, какая э. д. с. самоиндукции возникнет в катушке, если цепь разрывается и ток равномерно спадает до нуля за одну десятую долю секунды?

Решение. В рассматриваемом случае $\Delta i = 10$ *а*, $\Delta t = 0{,}1$ *сек*, значит, $\Delta i/\Delta t = 100$ *а/сек*.

Наводимая э. д. с. самоиндукции

$$Э = L\cdot\frac{\Delta i}{\Delta t} = 20 \text{ гн}\cdot 100 \text{ а/сек} = 2\,000 \text{ в}.$$

Как видно, эта э. д. с. очень велика, несмотря на постепенность выключения.

Пример 2. Индуктивность кабельной линии длиной 1 *км* составляет приблизительно 0,15 *мгн* (т. е. 15 стотысячных генри).

Индуктивность воздушной высоковольтной линии передачи составляет около 1,2 *мкгн/км* (т. е. примерно в 8 раз больше). И в том и в другом случае индуктивности малы. Индуктивность воздушной линии больше индуктивности кабельной линии, так как в последней значительно меньше расстояние между проводами, а следовательно, меньше и магнитный поток, сцепленный с линией при одном и том же токе.

Требуется найти э. д. с. самоиндукции в кабельной и воздушной линиях при скорости нарастания тока в $3\cdot 10^6$ *а/сек*.

В кабельной линии

$$Э = L\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0{,}15\cdot 10^{-3} \text{ гн/км } 3\cdot 10^6 \text{ а/сек} = 450 \text{ в/км}.$$

В воздушной линии

$$Э = L\frac{\Delta i}{\Delta t} = 1,2\cdot10^{-3}\ гн/км\ 3\cdot10^6\ а/сек = 3\,600\ в/км.$$

Направление э. д. с. самоиндукции. Электродвижущая сила самоиндукции в соответствии с законом Ленца всегда направлена так, чтобы препятствовать происходящему изменению тока.

Если ток нарастает, э. д. с. самоиндукции стремится противодействовать току; если ток убывает, э. д. с. самоиндукции стремится поддержать ток.

3-16. ВЛИЯНИЕ САМОИНДУКЦИИ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

При включениях и выключениях цепи при изменениях нагрузки, другими словами, при любом изменении тока в электрической цепи в ней возникают э. д. с. самоиндукции, препятствующие мгновенному изменению тока.

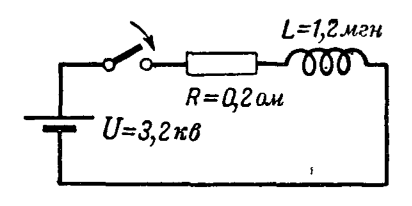


Рис. 3-46. Включение цепи (линии передачи), обладающей индуктивностью $L = 1,2$ *мгн*, к генератору с э. д. с. 3,6 *кв*. Внутренним сопротивлением (и собственной индуктивностью) генератора пренебрегаем.

Чтобы лучше разобраться, рассмотрим пример переходного процесса, происходящего при включении воздушной линии.

Пусть воздушная линия электропередачи при длине 1 *км* обладает самоиндукцией

$$L = 1,2\ мгн\ (миллигенри)$$

Предположим, что сопротивление такой линии $r = 0,2$ *ом*. Пусть линия в конце (т. е. на расстоянии 1 *км*) замкнута накоротко, а в начале к ней подключается генератор с напряжением $U = 3\,600$ *в* (рис. 3-46). Попробуем разобраться в том, как должен нарастать ток в линии после ее подсоединения к генератору. Мы уже знаем из решения примера 2 предыдущего параграфа, что при напряжении 3,6 *кв* и при индуктивности $L = 1,2$ *мгн* скорость нарастания тока составляет 3 млн. *а* за секунду

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{Э}{L} = \frac{3,6\ кв}{1,2\ мгн} = \frac{3,6\cdot10^3\ в}{1,2\cdot10^{-3}\ гн} = 3\cdot10^6\ а/сек.$$

Кроме того, по закону Ома легко найти ток

$$I=\frac{Э}{r}=\frac{3\,600\ в}{0{,}2\ ом}=18\,000\ а,$$

который должен протекать по линии при отсутствии э. д. с. самоиндукции.

Мы знаем скорость нарастания тока $\frac{\Delta i}{\Delta t}=3\cdot 10^6$ *а/сек* и знаем, на сколько должен возрасти ток: от нуля до $I=18\,000\ а$, т. е. мы знаем, что $\Delta i=I=18\,000\ а$.

Казалось бы, нетрудно найти промежуток времени, требующийся для возрастания тока:

$$\Delta t=\frac{I}{\Delta i/\Delta t}=\frac{18\cdot 10^3\ а}{3\cdot 10^6\ а/сек}=6{,}0\cdot 10^{-3}\ сек$$

или 6,0 миллисекунды[1].

Однако найденный ответ, конечно, не точен. Дело в том, что

по мере роста тока скорость его нарастания должна уменьшаться.

Докажем это. Пусть ток уже возрос до $i=9\,000\ а$, т. е. до половины I. В таком случае по закону Ома на одно сопротивление $r=0{,}2$ *ом* приходится напряжение

$$U_R=9\,000\ а\cdot 0{,}2\ ом=1\,800\ в.$$

Остальная часть напряжения генератора ($Э_г$) должна быть уравновешена э. д. с. самоиндукции ($Э_L$):

$$Э_L=Э_г-U_R=Э_г-i\cdot r.$$

Сказанное здесь поясняется схемой, показанной на рис. 3-47: э. д. с. самоиндукции равна разности между напряжением генератора и падением напряжения в сопротивлении

$$U_R=i\cdot r.$$

Вместе с тем эта э. д. с. равна произведению из индуктивности L на скорость нарастания тока.

[1] Можно рассуждать так: возрастание тока Δi составляет I, разделив известную величину Δi (делимое) на неизвестное время Δt (делитель), мы получаем известное нам частное ($3\cdot 10^6$ *а/сек*): значит, неизвестный делитель можно найти, разделяя делимое на частное.

Значит, $$Э_L = L\frac{\Delta i}{\Delta t} = Э_г - i \cdot r.$$

В нашем случае

$$Э_г = 3\,600\ в,$$

$$ir = 9\,000\ а \cdot 0{,}2\ ом = 1\,800\ в,$$

значит,

$$L\frac{\Delta i}{\Delta t} = 3\,600 - 1\,800 = 1\,800\ в.$$

Чтобы найти саму скорость нарастания тока, остается разделить найденное значение э. д. с. самоиндукции на величину $L = 1{,}2$ *мгн*:

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{1\,800\ в}{1{,}2 \cdot 10^{-3}\ гн} = 1{,}5 \cdot 10^6\ а/сек.$$

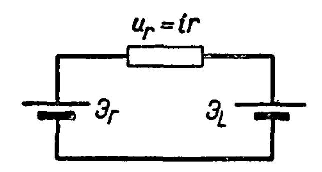


Рис. 3-47. К расчету нарастания тока в цепи, показанной на рис. 3-46.

$Э_г$ — э. д. с. генератора; $Э_L$ — э. д. с. самоиндукции, препятствующая нарастанию тока и равная $L\Delta i/\Delta t$; u_r — напряжение, приходящееся на сопротивление r.

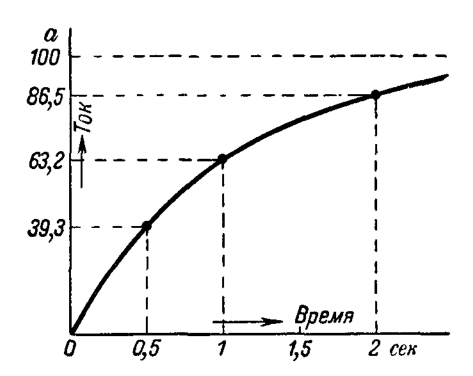


Рис. 3-48. На графике показано, как происходит нарастание тока в цепи примера 1.

За начало отсчета времени принят момент включения генератора. К моменту времени 0,5 *сек* ток достигает значения 39,3 *а*. К моменту времени 1 *сек* высота кривой достигает уровня 63,2 *а*. Наконец, через 2 *сек* после включения ток достигает 86,5 *а*. Установившееся значение тока составляет 100 *а*. Значит, через 2 *сек* ток не дошел до установившегося значения на 13,5%

Приведенный здесь график пригоден для показанного случая включения при любых значениях $Э$, r, L, если полагать, что:

1) по вертикальной оси отложены значения тока в процентах от установившегося;

2) числа, отложенные по горизонтальной оси, надо умножать на L/r для того, чтобы они действительно обозначали время в секундах, протекшее с момента включения генератора.

При вычислении L/r нужно L выражать в генри, а r — в омах. Это отношение часто обозначают греческой буквой τ („тау") и называют „постоянная времени".

Итак, к тому мгновению, когда ток достиг половины своего наибольшего значения, скорость нарастания тока уменьшилась ровно вдвое (было 3 млн., а стало 1,5 млн. *а* за секунду).

Когда ток равен нулю ($ir = 0$), скорость его возрастания больше всего:

$$L\frac{\Delta i}{\Delta t} = Э_г.$$

Когда ток достигает значения, требуемого законом Ома,

$$I = \frac{Э_г}{r},$$

на долю самоиндукции ничего не остается:

$$Э_L = L\frac{\Delta i}{\Delta t} = Э_г - I \cdot r = 0.$$

Это установившееся состояние: под действием постоянной э. д. с. генератора в цепи течет постоянный ток[1].

Закон нарастания тока. На рис. 3-48 показана кривая, изображающая постепенное нарастание тока в цепи, содержащей сопротивление r и индуктивность L, при включении этой цепи к источнику (генератору) постоянного напряжения.

Как пользоваться этим графиком, пояснено в подписи к нему.

Пример 1. Генератор с напряжением $U = 200$ *в* включается к цепи, содержащей сопротивление $r = 2$ *ом* и обладающей индуктивностью $L = 2$ *гн*.

Требуется узнать, через сколько времени после включения ток достигнет 86,5% от установившегося значения

$$I = \frac{U}{r} = \frac{200 \text{ в}}{2 \text{ ом}} = 100 \text{ а}.$$

Решение. Как видно из рис. 3-48 и подписи к нему, 86,5% тока достигается через 2 *сек* после включения генератора, так как в нашем примере

$$\frac{L}{r} = \frac{2 \text{ гн}}{2 \text{ ом}} = 1.$$

Если бы L/r было отлично от единицы, число 2 нужно было бы умножить на эту дробь L/r.

Пример 2. В линии передачи

$$L = 1{,}2 \text{ мгн}, \quad r = 0{,}2 \text{ ом}.$$

Через какую долю секунды после включения ток в линии достигнет 63,2% от своего установившегося значения.

Решение. Из рис. 3-48 находим, что уровень, соответствующий 63,2%, достигается в тот момент, когда на оси отсчета времени стоит цифра 1.

---

[1] Ведь если скорость изменения тока равна нулю, т. е. $\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0$, значит, ток не меняется, остается постоянным.

Но для того чтобы найти время, нужно эту цифру умножить на L/r. А эта дробь в нашем примере

$$1 \cdot \frac{L}{r} = 1 \cdot \frac{1{,}2 \cdot 10^{-3}\ гн}{0{,}2\ ом} = 6 \cdot 10^{-3}\ сек.$$

3-17. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОСЦИЛЛОГРАФ — ПРИБОР ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Изменение тока при включении и выключении генератора или нагрузки происходит, как правило, очень быстро (L/R—мало). При помощи обычных стрелочных амперметров и вольтметров нет никакой возможности проследить за быстро происходящими изменениями тока и напряжения.

Вместе с тем иногда бывает очень важно знать, как протекает переходный процесс.

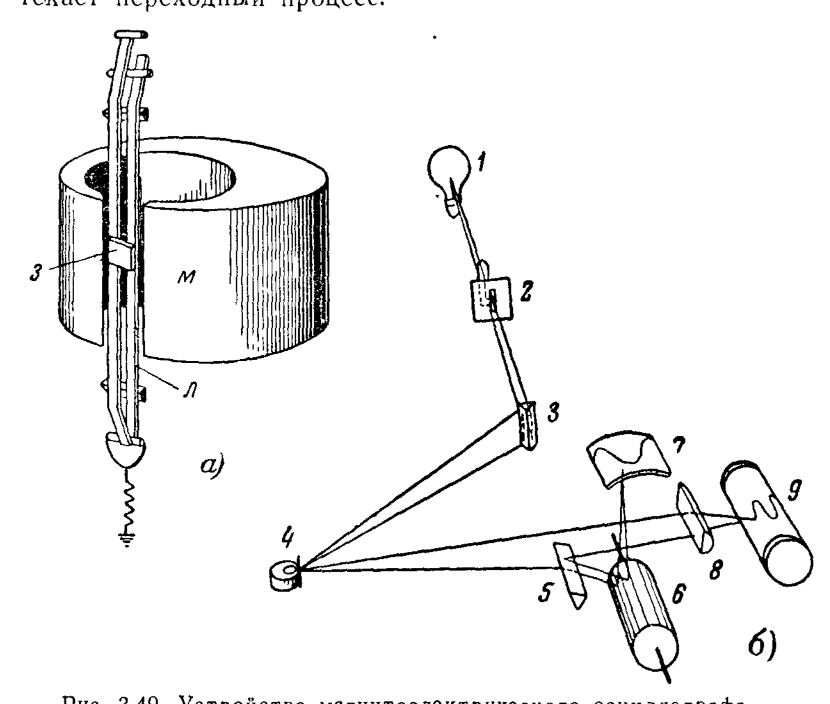


Рис. 3-49. Устройство магнитоэлектрического осциллографа.

По тонкой петельке *Л* из проводов проходит ток, подлежащий наблюдению. Петелька расположена между полюсами маленького, но сильного магнита *М*. При протекании тока петелька слегка поворачивается. Вместе с петелькой поворачивается и маленькое зеркальце *3*, прикрепленное к ней. Поворот зеркальца (даже очень маленький) приводит к заметному смещению точки падения луча на барабан. При равномерном вращении барабана луч вычерчивает на его поверхности зависимость тока, протекающего через петлю, от времени Вследствие малых размеров петли и зеркальца они успевают следовать за всеми изменениями тока.

Для этой цели разработаны специальные приборы, записывающие световым лучом на фотографической пленке весь ход изменений тока (или напряжения).

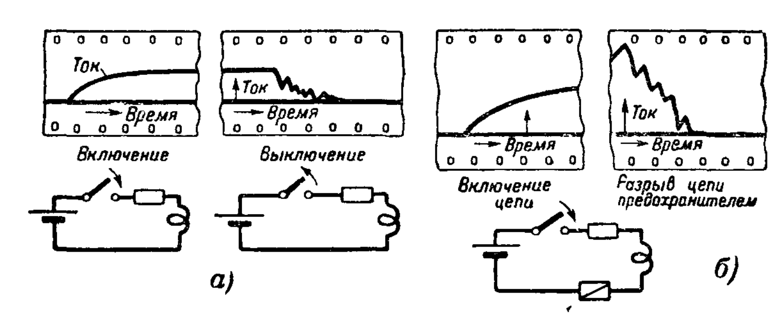


Рис 3-50. Осциллограммы переходных процессов в цепи, содержащей индуктивность и сопротивление.

а — включение цепи и ее выключение, сопровождающееся горением дуги, *б* — включение цепи и разрыв тока, происшедший из-за расплавления предохранителя. На всех осциллограммах проведена горизонтальная прямая, от которой нужно отсчитывать отклонение луча, записывающего ток.

На рис. 3-49 объясняется действие одного из таких приборов, называемого магнитоэлектрическим осциллографом.

На рис. 3-50 показаны фотографии (осциллограммы), записанные магнитоэлектрическим осциллографом. Они изображают переходные процессы.

3-18. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

В магнитном поле заключена энергия — мы пришли к этому выводу, наблюдая возможность совершать механическую работу за счет энергии, запасенной в магнитном поле, наблюдая передачу механического воздействия через посредство магнитного поля и т. п. (см. первые параграфы этой главы).

Из всех наблюдений за электрической цепью, содержащей индуктивность, можно также отчетливо убедиться, что в магнитном поле заключена энергия.

В самом деле, как иначе можно объяснить передачу энергии из одной цепи в другую посредством индуктивной связи (рис. 3-51—3-52)?

Запасом энергии в магнитном поле легко объяснить и мощное образование дуги при выключении цепи с большой индуктивностью: в цепи с током существовало магнитное поле, в магнитном поле была заключена энергия; мы раз-

ваем цепь — ток исчезает, исчезает и магнитное поле, значит, исчезает и энергия.

Но есть незыблемый закон сохранения энергии: энергия жет переходить из одной формы в другую (из тепловой электромагнитную, из химической в тепловую и т. д.), но ергия не может исчезнуть.

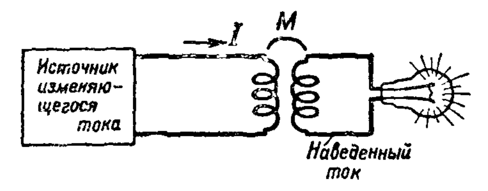


Рис. 3-51. Электрическая лампочка ярко светится под действием э. д. с. взаимной индукции. Источник питания держится только в первичной цепи, следовательно, энергия передается через магнитное поле, индуктивно связывающее две цепи.

Мы разрываем цепь тока; исчезающая энергия магнитого поля выделяется при горении дуги (или при образовании искры), раскаляя воздух, оплавляя ножи рубильника т. д.

Сравните эти явления с теми, которые можно наблюать при торможении железнодорожного состава, при тор-

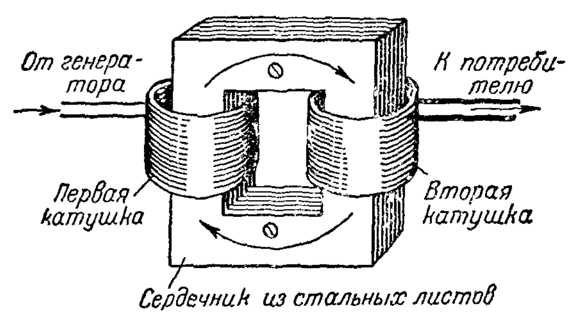


Рис. 3-52. В простейшем трансформаторе цепь источника энергии генератора замкнута на одну катушку; цепь потребителя присоединена ко второй катушке, как к генератору.

Обе катушки посажены на общий стальной сердечник Изменения тока в первой катушке сопровождаются изменениями магнитного потока в сердечнике. Изменяющийся магнитный поток наводит э. д. с. во второй катушке. К ней можно присоединять нагрузку, как к генератору.

можении маховика: в железнодорожном составе запасена энергия движения (кинетическая энергия); остановка состава связана с исчезновением этой энергии; при торможении эта исчезающая энергия выделяется главным образом в нагреве тормозных колодок и бандажей колес (вероятно, всем известно, как греются тормоза. Посмотрите вечером на колеса заторможенного железнодорожного состава: от колодок отрываются мелкие частицы металла, раскаляемые при трении колодок о бандажи).

Всем известно, что из-за этой же энергии движения всегда затруднено трогание с места: поезд и автомобиль могут лишь постепенно набирать скорость, так же как они только постепенно могут снижать скорость.

Энергией магнитного поля объясняется и постепенность нарастания электрического тока в цепях с заметной индуктивностью: нарастание тока в такой цепи связано с накоплением энергии в ее магнитном поле, а накопление энергии происходит лишь постепенно. Длительность протекания переходных процессов в электромагнитных системах значительно меньше длительности переходных процессов в обычных механических системах (ток нарастает и исчезает в электрической цепи значительно быстрее, чем развивает скорость и останавливается автомобиль или железнодорожный состав).

Энергия магнитного поля ($W_м$) в цепи электрического тока выражается такой формулой

$$W_м = \frac{1}{2} L \cdot I^2.$$

Она равна половине произведения собственной индуктивности и квадрата тока.

Пример 1. Индуктивность цепи L равна 2 *гн*. Требуется подсчитать энергию магнитного поля цепи $W_м$ при протекании тока I, равного 100 *а* (ср. пример 1 § 3-16).

Решение. По приведенной выше формуле находим:

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 100^2 = 10\,000 \text{ джоулей или ватт-секунд.}$$

Пример 2. Вычислим энергию двухпроводной воздушной линии, имеющей индуктивность 1,2 *мгн/км* (ср. пример 2 § 3-16), когда по линии протекает ток короткого замыкания $I_{к.з} = 10\,000$ *а*.

Решение.

$$W_м = \frac{1}{2} 1{,}2 \cdot 10^{-3} \; гн \; (10^4 \; а)^2 = 6 \cdot 10^4 \; вт \cdot сек/км.$$

Пример 3. Пусть сопротивление линии, рассмотренной в предыдущем примере, $R = 0{,}2$ *ом/км* и, следовательно, для поддержания тока 10 000 *а* нужно всего 2 000 *в* (если ток не меняется и, значит, нет э. д. с. самоиндукции).

Спрашивается: сколько времени нужно для накопления энергии, вычисленной в предыдущем примере при постоянном напряжении = 2 000 *в* и среднем токе, равном 1/4 установившегося, т. е. при токе

$$I_{ср} = \frac{1}{4}\,10\,000\ a = 2\,500\ a?$$

Решение. Мы знаем, что средняя мощность, отдаваемая источником постоянного напряжения,

$$P = U \cdot I_{ср}.$$

Следовательно, энергия, подведенная от источника,

$$W = P \cdot t = U \cdot I_{ср} \cdot t.$$

Если бы вся эта энергия шла на создание магнитного поля, мы могли бы составить такое равенство:

$$U \cdot I_{ср} \cdot t = W_м,$$

откуда

$$t = \frac{W_м}{U \cdot I_{ср}} = \frac{6 \cdot 10^4\ вт\,сек}{2\,000 \cdot 2\,500\ вт} = 12\ \text{миллисекунд},$$

т. е. 12 тысячных доли секунды.

Этот пример, конечно, очень грубый: у нас нет никаких оснований предполагать, что среднее значение тока составляет ¼ установившегося, кроме того, мы не учли такого важного обстоятельства — не вся поступающая от генератора энергия идет на создание магнитного поля, значительная часть этой энергии рассеивается в форме тепла (в соответствии с законом Ленца — Джоуля).

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЖЕЛЕЗО В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ

4-1. ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА ДЛЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ПРИ ОТСУТСТВИИ ЖЕЛЕЗА

Магнитное поле, создаваемое током, пропорционально току — чем больше ток, тем сильнее поле. Удвоение тока приводит к удвоению индукции. Так обстоит дело, когда магнитное поле создается в любой среде (воздух, керамика, медь и т. п.), за исключением железа и других материалов, подобных железу по магнитным свойствам (никель, кобальт, разные стали, чугун и т. п.). Эти материа-

лы называются ферромагнитными, т. е. магнитными, как железо (феррум).

Обратимся сначала к рассмотрению магнитного поля токов в отсутствии ферромагнитных тел. Изобразим магнитное поле рядом линий, как мы это делали раньше в § 3-1. Если вдоль какой-нибудь из линий значение магнитной индукции остается постоянным, то для такой линии очень просто выражается один из основных законов магнитного поля — закон полного тока.

Произведение магнитной индукции B на длину замкнутой линии l равно полному току I, охваченному этой линией, умноженному на коэффициент k, зависящий от выбранных единиц мер,

или

$$B \cdot l = k \cdot I.$$

Если индукцию выражать в гауссах, длину в сантиметрах, а ток в амперах, то коэффициент k окажется равным $0{,}4\pi = 1{,}25$ и закон полного тока пишется так[1]:

$$B(гс) \cdot l(см) = 0{,}4\pi \cdot I(а) = 1{,}25 \cdot I(а).$$

Разделив обе части равенства на 1,25, можем придать ему и такой вид:

$$0{,}8B(гс) \cdot l(см) = I(а).$$

На практике встречается не очень много случаев, когда можно считать индукцию одной и той же вдоль целой замкнутой линии поля. Но такие случаи все же есть, и приведенное здесь выражение для закона полного тока оказывается очень полезным.

Применение закона полного тока для поля длинного прямолинейного круглого провода. Линии магнитного поля, созданного длинной проволокой с током, образуют ряд окружностей. Центры всех этих окружностей лежат на оси провода.

Картину поля такого провода мы уже рисовали (рис. 3-18). На рис. 4-1 показана одна линия, отстоящая на расстоянии r от оси провода. Длина такой линии

$$l = 2\pi \cdot r.$$

[1] π — число, выражающее отношение длины окружности к диаметру. $\pi = 3{,}14$.

Ток, охваченный линией, это ток провода I. Значит, по закону полного тока

$$B \cdot l = 0{,}4\pi \cdot I$$

или

$$B = 0{,}4\pi \frac{I}{l}.$$

Если в последнюю формулу подставить $2\pi \cdot r$ вместо l и произвести сокращение, то мы получим выражение

$$B(гс) = \frac{0{,}2I\,(а)}{r\,(см)},$$

которым мы уже пользовались в § 3-7.

Применение закона полного тока к кольцевой катушке. Возьмем фарфоровое кольцо прямоугольного сечения (рис. 4-2) и равномерно обмотаем его изолированным проводом. Внутри кольцевой катушки образуется магнитное поле, если по обмотке пустить ток.

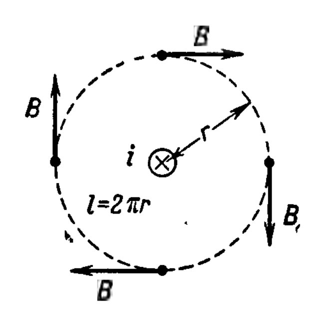


Рис. 4-1. К применению закона полного тока.

В середине рисунка изображено сечение круглого провода, проходящего через плоскость рисунка. Окружностью показана одна из магнитных линий.

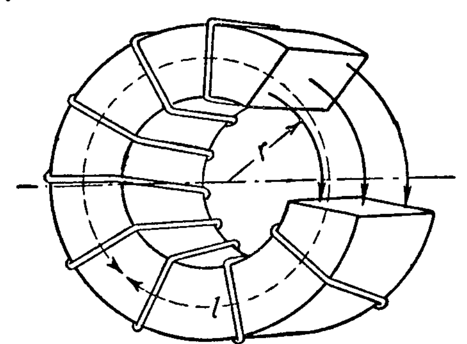


Рис. 4-2. Кольцевая катушка (тороид).

Для наглядности рисунка одна четверть кольца вырезана и на его месте показаны три магнитных линии Пунктиром показана одна из линий, имеющая длину l.

Линии магнитного поля в этом случае являются рядом окружностей, проходящих внутри кольца. На рис. 4-2 показаны три такие линии (в вырезанной четверти).

Вдоль каждой из таких линий значение магнитной индукции остается неизменным. Это можно заключить на основании симметричности кольцевой катушки. Итак, для каждой из линий, образующих окружность радиуса r, мы

можем написать левую часть нашего равенства, выражающего закон полного тока:

$$B \cdot l = B \cdot 2\pi \cdot r = \ldots$$

Но что теперь надлежит написать в правой стороне? Какой полный ток сцеплен с нашими магнитными линиями?

Если обмотка на кольце состоит из w витков и в каждом витке течет ток I, то *полный ток*, сцепленный с магнитными линиями, *равен произведению тока на число витков.*

В правой части недописанного нами равенства нужно поставить

$$\ldots = 0{,}4\pi \cdot w \cdot I.$$

Из полученного равенства

$$B \cdot l = B \cdot 2\pi \cdot r = 0{,}4\pi \cdot w \cdot I$$

легко вывести формулу для определения индукции внутри кольца

$$B\,(гс) = 0{,}4\pi \frac{w \cdot I\,(a)}{l\,(см)} = \frac{0{,}2w \cdot I\,(a)}{r\,(см)}.$$

В средней части последнего равенства стоит отношение полного тока к длине магнитной линии. Это отношение часто называют удельными ампервитками или ампервитками на сантиметр. Мы будем называть его в дальнейшем удельным полным током:

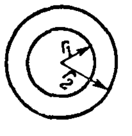
$$(I \cdot w)_0 = \frac{I \cdot w}{l}.$$

Очевидно, что индукция внутри кольца зависит не отдельно от тока, витков и длины линии, а именно от удельного полного тока:

$$B = 1{,}25\,(I \cdot w)_0.$$

Пример 1. Фарфоровое кольцо имеет размеры, показанные на чертеже (рис. 4-3). На кольце равномерно нанесена обмотка с числом витков $w = 500$.

Нужно определить магнитную индукцию у внутреннего (r_1) и наружного (r_2) краев кольца при токе в обмотке, равном 10 *а.*



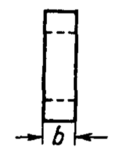


Рис. 4-3. К примеру 1. $r_1 = 4{,}5$ *см*; $r_2 = 5{,}5$ *см*; $b = 3$ *см.*

Решение. Применяя закон полного тока, находим:
у внутреннего края

$$B_1 = \frac{0,2w \cdot I}{r_1} = \frac{0,2 \cdot 500 \cdot 10}{4,5} = 222\ гс,$$

у наружного края

$$B_2 = \frac{0,2w \cdot I}{r_2} = \frac{0,2 \cdot 500 \cdot 10}{5,5} = 182\ гс.$$

Пример 2. Найти собственную индуктивность L кольца предыдущего примера[1].

Решение. Среднее значение индукции по сечению кольца можно принять приблизительно равным 200 *гс* при 10 *а* или 20 *гс* при 1 *а*

Магнитный поток, сцепленный с каждым из витков (при токе в 1 *а*), составляет

$$\Phi_0 = B \cdot S = 20\ гс \cdot 3\ см^2 = 60\ мкс,$$

здесь $S = 3\ см^2$ — поперечное сечение кольца.

При изменении тока со скоростью 1 *а/сек* мы имеем скорость изменения потока

$$\frac{\Delta\Phi_0}{\Delta t} = 60\ мкс/сек.$$

Значит, в каждом витке наведется э. д. с.

$$Э_0 = 10^{-8}\ 60\ в = 6 \cdot 10^{-7}\ в,$$

а по всей катушке (содержащей $w = 500$ витков)

$$Э = w \cdot Э_0 = 60 \cdot 500 \cdot 10^{-8}\ в = 3 \cdot 10^{-4}\ в$$

Но если при $\frac{\Delta i}{\Delta t} = 1$ *а/сек* мы имеем $Э = 3 \cdot 10^{-4}\ в$, то это значит, что

$$L = 3\ 10^{-4}\ гн = 0,3\ мгн\ \text{(миллигенри)}.$$

Пример 3. На той же катушке, кроме первой обмотки, нанесена вторая. Число витков этой второй обмотки (w_2) равно 1 000 виткам.

Требуется определить взаимную индуктивность между обмотками[2]

Решение. Мы знаем, что при скорости изменения тока $\frac{\Delta i}{\Delta t} = 1$ *а/сек* в каждом витке наводятся э. д. с. $Э_0 = 6 \cdot 10^{-7}\ в$, значит, в 1 000 витках вторичной обмотки наведется э. д. с., равная

$$Э = 6 \cdot 10^{-4}\ в \text{ при } \frac{\Delta i}{\Delta t} = 1\ а/сек.$$

Это позволяет определить взаимную индуктивность обмоток

$$M = 6 \cdot 10^{-3}\ гн = 0,6\ мгн.$$

---

[1] См § 3-15

[2] См. § 3-14.

4-2. НАМАГНИЧИВАНИЕ ЖЕЛЕЗНОГО КОЛЬЦА

Изготовим железное кольцо и нанесем на него две изолированные обмотки (как в последнем примере предыдущего параграфа).

Изменяя ток в первой обмотке и наблюдая за величиной э. д. с., наводимой во второй обмотке, легко проследить за всеми изменениями магнитного потока, происходящими при изменении тока. Но по величине магнитного потока Ф и сечению кольца S всегда можно вычислить и значения магнитной индукции

$$B=\frac{\Phi}{S}.$$

На рис. 4-4 представлены результаты наблюдений, произведенных над кольцом из чистого отожженного железа

Опыт показывает, что для однородного кольца значения индукции зависят только от удельного полного тока, т е от $I\ w/l$.

Различие в наблюдаемом магнитном действии тока в случаях ферромагнитного (железного) и неферромагнитного (мраморного, бронзового и т. п.) колец чрезвычайно велико.

Действительно, пусть

$$Iw_0=\frac{I\cdot w}{l}=4\ a/см.$$

Этому действию намагничивающей обмотки, как видно из графика (точка a на рис. 4-3), соответствует индукция $B=12\,000$ *гс*.

По закону полного тока такой намагничивающий ток в неферромагнитной среде создал бы индукцию всего лишь в 5 *гс*:

$$B=0{,}4\pi\frac{I\cdot w}{l}=0{,}4\pi\cdot 4=5\ гс.$$

Важная особенность ферромагнитных тел заключается в том, что уже при очень слабом намагничивающем токе в них возникает большая индукция Эта индукция намного больше индукции, которую тоже намагничивающее действие может создать во всех других неферромагнитных телах (в воздухе, меди, стекле, бронзе, воде и т. д.).

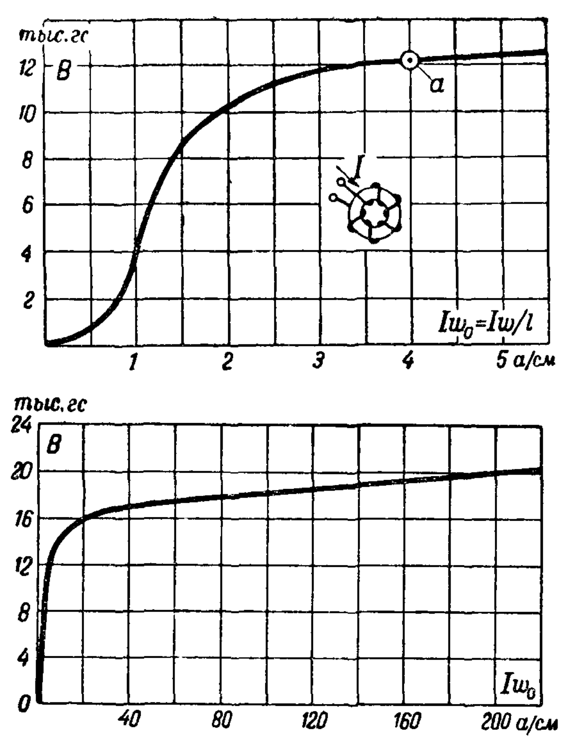


Рис. 4-4. Магнитная характеристика очень чистого железа. По вертикали отложены значения индукции (в тысячах гаусс). По горизонтальной оси отложены значения тока I, умноженного на число витков, приходящихся на 1 *см* кольца, т. е. $I \cdot w_0 = I \cdot w/l$.

Не значит ли это, что в железе и других подобных железу телах легче создается магнитное поле?

И да и нет!

4-3. МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Конечно, в железе создалось поле с индукцией $B = 12\,000$ *гс* вместо $B = 5$ *гс*, которые получились бы в воздухе. Поэтому можно сказать, что по сравнению с воздухом железо в 2 400 раз более «проницаемо» для магнитного поля.

Магнитной проницаемостью железа можно назвать отношение магнитных индукций в железе и в воздухе

$$\mu = \frac{B_ж}{B_в},$$

если магнитное поле наблюдается внутри одинаковых кольцевых катушек, одна из которых намотана на железном кольце, а другая не содержит никаких ферромагнитных тел [1].

При этом, конечно, значения индукции $B_ж$ и $B_в$ определяются при одном и том же значении удельного полного тока.

Магнитная проницаемость одного и того же ферромагнитного материала при различных значениях индукции различна. В самом деле, представим магнитную характеристику, показанную на рис. 4-4, в виде табл. 4-1: в первой строчке поставлены значения удельного полного тока $(I \cdot w/l)$, во второй — значения магнитной индукции, наблюдаемой в железе (замкнутое кольцо внутри катушки), в третьей строке — значения магнитной индукции в такой же кольцевой катушке без ферромагнитных тел.

ТАБЛИЦА 4-1

$I \cdot w/l$	0,5	1	2,0	10	20	100	1 000	2 000
$B_ж$	800	4 000	10 700	15 400	16000	16500	22500	24 000
$B_в$	0,625	1,25	2,5	12,5	25	125	1 250	2 500
$\mu = \frac{B_ж}{B_в}$	1 280	3 200	4 280	1 230	640	132	18	9,6

Первые две строки таблицы соответствуют опытам, по которым построена магнитная характеристика рис. 4-4. Третья строка вычислена по формуле

$$B_в = 1{,}25 I \cdot w/l.$$

Значения магнитной проницаемости для разных индукций вычислены по формуле

$$\mu = B_ж / B_в.$$

[1] Наиболее употребительным в технике ферромагнитным материалом является сталь. Поэтому часто вместо $B_ж$ пишут $B_{ст}$.



Александр Григорьевич Столетов (1839—1896 гг.).

Как видно из таблицы, магнитная проницаемость сначала растет, а затем уменьшается. Полученные результаты могут быть изображены графиком, показанным на рис. 4-5.

Первые исследования магнитных свойств материалов на замкнутых кольцевых образцах и установление характера изменения проницаемости с полем принадлежат нашему физику, профессору Московского университета А. Г. Столетову. Он подчеркивал, что для развивающейся электротехники также важно знать магнитные свойства стали, как для строителей паровых машин нужно знать свойства пара.

Уменьшение магнитной проницаемости с ростом индукции представляет собой вторую характерную особенность ферромагнитных тел. Сначала они легко намагничиваются; магнитная индукция достигает нескольких тысяч при достаточно слабых намагничивающих токах. Однако дальнейшее увеличение магнитной индукции требует все более и более значительного увеличения тока — создать индукцию выше приблизительно 20—22 тыс. *гс* в железе очень трудно. На это указывает отлогий ход магнитной характеристики, изображенной на рис. 4-4, в области больших индукций.

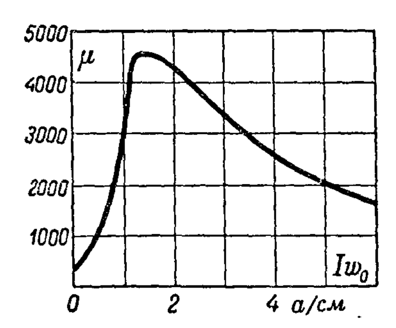


Рис. 4-5. Магнитная проницаемость чистого железа в зависимости от удельного полного тока.

Чтобы увеличить индукцию от 16,5 до 22,5 тыс. *гс*, удельный полный ток, т. е. число ампер-витков на сантиметр, должен быть увеличен от 100 до 1 000. Но для

того чтобы увеличить индукцию еще на 1,5 тыс. *гс*, требуется увеличить намагничивающий ток до 2 000 *а/см* (см. табл. 4-1). При индукции порядка 20—22 тыс. *гс* наступает, как говорят, магнитное насыщение.

Пример 1. В кольцевой катушке с числом витков $w = 500$ при средней длине стального сердечника 25 *см* протекает ток $I = 1$ *а*. Магнитный поток в стальном сердечнике, имеющем поперечное сечение $S = 6$ *см²*, оказывается равным:

$$\Phi = 87\,000 \text{ мкс.}$$

Требуется определить магнитную проницаемость стали.

Решение. Магнитная индукция в стали

$$B_{\text{ст}} = \frac{\Phi}{S} = 14\,500 \text{ гс.}$$

В той же катушке при отсутствии ферромагнитного сердечника индукция была бы равна

$$B_{\text{в}} = 1,25\frac{Iw}{l} = 1,25 \cdot 20 = 25,0 \text{ гс.}$$

Значение магнитной проницаемости (при индукции 14 500 *гс*)

$$\mu = \frac{B_{\text{ст}}}{B_{\text{в}}} = \frac{14\,500}{25} = 580.$$

Пример 2. В той же кольцевой катушке при токе 10 *а* магнитный поток в стали достиг значения

$$\Phi = 108\,000 \text{ мкс.}$$

Показать, что магнитная проницаемость при новом значении индукции уменьшилась до

$$\mu = 72.$$

Решение этого примера предоставляем читателю.

4-4. РАСЧЕТ ПОЛЯ В КОЛЬЦЕВОЙ КАТУШКЕ СО СПЛОШНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ ПО МАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Магнитная проницаемость является переменной величиной, зависящей от поля. Поэтому при расчетах часто оказывается удобнее прямо исходить из магнитных характеристик, не обращаясь к определению μ (проницаемости).

Пример 1. В тороиде (кольцевой катушке) со стальным сердечником требуется создать магнитный поток $\Phi = 32\,000$ *мкс*.

Поперечное сечение стального сердечника (кольца) 4 *см²*, его средняя длина 20 *см*. Обмотка содержит 100 витков. Магнитная характеристика сердечника показана на рис. 4-6.

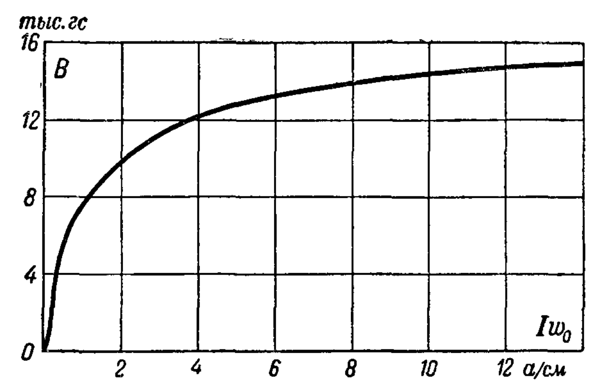


Рис 4-6. Магнитная характеристика электротехнической стали высокой проницаемости.

Какой ток должен протекать по обмотке?

Решение. Прежде всего, зная поток и сечение, легко определить требуемую индукцию

$$B=\frac{\Phi}{S}=\frac{32\,000\ мкс}{4\ см^2}=8\,000\ гс.$$

По графику рис. 4-6 находим, что для создания такой индукции требуется $I\cdot w/l=(I\cdot w)_0=1{,}1$ ампер-витка на 1 *см*. Но мы знаем длину сердечника ($l=20$ *см*) и полное число витков обмотки ($w=100$). Значит, на 1 *см* приходится

$$w{:}l=5 \text{ витков на 1 } см.$$

Требуемое значение тока

$$\frac{I\cdot w/l}{w/l}=I=\frac{1{,}1}{5}=0{,}22\ а.$$

4-5. ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА ДЛЯ ОДНОРОДНОГО ПОЛЯ В ФЕРРОМАГНИТНОЙ СРЕДЕ

Закон полного тока для кольцевой катушки мы выражали формулой

$$B\cdot l=1{,}25\cdot I\cdot w.$$

Но в случае заполнения кольца сплошным стальным сердечником при том же токе и при тех же витках индукция увеличивается в μ раз. Следовательно, для того чтобы наша формула осталась верной и в случае стального (ферромагнитного) сердечника, нужно его индукцию разделить на μ:

$$\frac{B}{\mu}l=1{,}25\cdot I\cdot w$$

или

$$0{,}8\frac{B}{\mu}l = I\cdot w.$$

В таком виде выражение закона полного тока пригодно для любой однородной среды при условии, что путь l совпадает с магнитной линией и при условии однородности поля (магнитная индукция остается постоянной).

4-6. ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА ДЛЯ ПОЛЯ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Если магнитная линия проходит через две среды с разными проницаемостями μ_1 и μ_2, если индукция в одной среде B_1, а в другой B_2 и, наконец, если длина линии в первой среде l_1, а во второй l_2, то и в этом случае мы можем применить закон полного тока. Только теперь в левой части должна стоять сумма значений $\frac{B}{\mu}l$ для первой и второй сред, т. е.

$$\frac{B_1}{\mu_1}l_1 + \frac{B_2}{\mu_2}l_2.$$

Если путь l_2, продолженный путем l_2, образует замкнутую линию, то указанная выше сумма равна по-прежнему полному току, умноженному на $0{,}4\pi$, т. е. равна $1{,}25\cdot I\cdot w$.

Опыт неукоснительно подтверждает справедливость этого закона:

$$\frac{B_1}{\mu_1}l_1 + \frac{B_2}{\mu_2}l_2 = 1{,}25\cdot I\cdot w.$$

В следующем § 4-7 мы рассмотрим его применение к важному случаю кольцевой катушки с разрезанным сердечником.

Закон, сформулированный здесь для двух сред, можно распространить и на случай трех или большего числа разных сред, пронизываемых одной замкнутой линией. С левой стороны при этом окажется сумма таких же произведений $\frac{B}{\mu}l$, взятая обязательно по замкнутому контуру; справа будет стоять умноженный на 1,25 полный ток, сцепленный с рассматриваемой линией:

$$\Sigma\frac{B}{\mu}l = 1{,}25\cdot\Sigma Iw.$$

Знак Σ обозначает сумму.

Разделив обе части равенства на 1,25, можно, конечно, той же формуле придать и такой вид:

$$0{,}8\Sigma \frac{B}{\mu} l = \Sigma I w.$$

4-7. РАЗРЕЗАННЫЙ ТОРОИД

Возьмем стальное кольцо с разрезом (с воздушным зазором), намотаем на него обмотку и подключим ее к источнику тока (рис. 4-7).

В правой части формулы, выражающей закон полного тока, должно стоять $1{,}25 \cdot I \cdot w$.

В левой части нашей формулы теперь должна стоять сумма

$$\frac{B_{ст}}{\mu_{ст}} l_{ст} + B_в l_в.$$

Первое слагаемое в этой сумме относится к стали. $B_{ст}$ — индукция в стали; $l_{ст}$ — длина магнитной линии

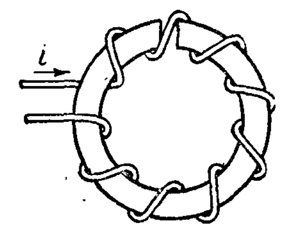


Рис. 4-7. Стальное кольцо с разрезом.

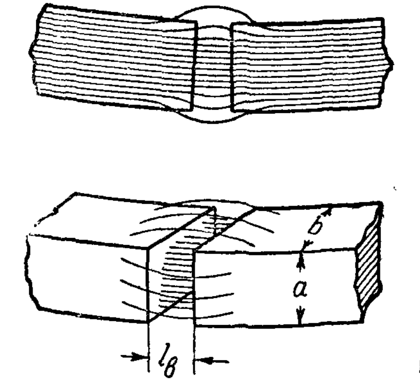


Рис. 4-8. Магнитное поле вблизи воздушного зазора разрезанного кольца изображено рядом линий магнитной индукции.

При выходе из железа линии индукции немного расширяются, но сейчас же втягиваются. Магнитный поток в воздухе распространяется на большее сечение, чем в железе. Однако это увеличение незначительно, если размеры b и a (ширина и высота железного кольца) много больше, чем ширина зазора $l_в$.

в стали; $\mu_{ст}$ — проницаемость стали.

Второе слагаемое относится к воздуху: $B_в$ — индукция в воздухе; $l_в$ — длина магнитной линии в воздухе.

Магнитная проницаемость воздуха по самому определению 1, поэтому во втором слагаемом отсутствует множитель $1:\mu_в = 1$.

Если воздушный зазор мал по сравнению с размерами поперечного сечения кольца, то можно считать индукцию в железе и воздухе одинаковой:

$$B_{\text{в}} = B_{\text{ст}} = B.$$

Сказанное иллюстрируется рисунком (рис. 4-8).

Предположим, что нам известны требуемая магнитная индукция B, магнитная проницаемость стали $\mu_{\text{ст}}$ (при этой индукции), длина кольца $l_{\text{ст}}$, длина воздушного зазора $l_{\text{в}}$. Нужно найти значение полного тока Iw, при котором будет достигнута требуемая индукция.

В таком случае ответ можно получить непосредственно из формулы

$$B\left(\frac{l_{\text{ст}}}{\mu_{\text{ст}}} + l_{\text{в}}\right) = 1{,}25 \cdot I \cdot w$$

или

$$0{,}8B\left(\frac{l_{\text{ст}}}{\mu_{\text{ст}}} + l_{\text{в}}\right) = I \cdot w$$

(заметим, что высокая проницаемость стали как бы сокращает в μ раз длину пути!).

Конечно, ту же формулу закона полного тока можно применить и к определению $\mu_{\text{ст}}$, если известны все остальные величины, или к определению B, тоже, конечно, если все остальные величины известны.

Лучше всего уяснить смысл приведенной формулы, решив несколько примеров.

Пример 1. Поперечное сечение стального сердечника

$$S = 16\ \text{см}^2.$$

Длина пути магнитного потока в стали (средняя длина)

$$l_{\text{ст}} = 50\ \text{см}.$$

Магнитиая индукция в стали

$$B_{\text{ст}} = 12\,000\ \text{гс}.$$

Магнитная проницаемость (при этой индукции)

$$\mu = 2\,600.$$

Длина воздушного зазора

$$l_{\text{в}} = 0{,}5\ \text{мм} = 0{,}05\ \text{см}.$$

Ввиду малости воздушного зазора можно принять, что индукция в нем не отличается от индукции в стали

$$B_{\text{в}} = B_{\text{ст}} = 12\,000 \text{ гс}.$$

Нужно найти полный ток, требуемый для создания такой индукции.

Решение. Подсчитываем слагаемые левой части формулы, выражающей закон полного тока

$$0{,}8\,\frac{B_{\text{ст}}}{\mu_{\text{ст}}}\,l_{\text{ст}} = 0{,}8\,\frac{12\,000 \text{ гс}}{2\,600}\,50 \text{ см} = 185 \text{ а},$$

$$0{,}8B_{\text{в}}\cdot l_{\text{в}} = 0{,}8\cdot 12\,000 \text{ гс}\cdot 0{,}05 \text{ см} = 480 \text{ а}.$$

Полный ток

$$0{,}8\Sigma\,\frac{B}{\mu}\,l = I\cdot w = 480 + 185 = 665 \text{ а}.$$

Если на сердечнике намотано 100 витков, то требуемый ток равен

$$I = 6{,}65 \text{ а}.$$

Пример 2. Какой ток должен быть пропущен через обмотку катушки предыдущего примера для создания индукции $B = 12\,000$ *гс*, если катушка содержит сердечник из такой же стали, но без воздушного зазора.

Решение. В нашем расчете теперь $I\cdot w$ равно просто $0{,}8\,\frac{B_{\text{ст}}}{\mu_{\text{ст}}}\,l_{\text{ст}}$, т. е. 185 *а*. Следовательно, требуемый ток составляет 1,85 *а*.

Пример 3. Чему должен быть равен ток в той же катушке при полном отсутствии стального сердечника, если по-прежнему нужно создать индукцию в 12 000 *гс*.

Ответ ясен из формулы

$$B\cdot l = 1{,}25\cdot I\cdot w,$$

т. е.

$$I\cdot w = 0{,}8B\cdot l = 0{,}8\cdot 12\,000\cdot 50 = 480\,000 \text{ а}$$

(ток 4 800 *а* — такой ток, конечно, нельзя длительно пропускать через обмотку).

Ответ можно было бы найти и прямо из определения магнитной проницаемости: в воздухе индукция была бы меньше в $\mu_{\text{ст}}$ раз при том же токе, значит, для получения той же индукции ток надо увеличить в $\mu_{\text{ст}}$ раз.

В предыдущем примере $\mu_{\text{ст}} = 2\,600$ и ток $I = 1{,}85$. Значит, теперь ток должен составить:

$$I = 1{,}85\cdot 2\,600 = 4\,800 \text{ а}.$$

Пример 4. В обмотке тороида (см. пример 1) ток увеличен до значения $I = 16{,}5$ *а*. Установившееся значение магнитной индукции при этом оказывается равным $B = 16\,000$ *гс*.

Требуется найти магнитную проницаемость стали.

Решение. Теперь нам известна правая часть закона полного тока

$$I \cdot w = 16{,}5\ a \cdot 100 = 1\,650\ a.$$

Легко вычислить и слагаемое, соответствующее воздуху (как бы доля полного тока, приходящаяся на воздух):

$$0{,}8 B_в \cdot l_в = 0{,}8 \cdot 16\,000 \cdot 0{,}05 = 640\ a.$$

Слагаемое, соответствующее стали (как бы доля полного тока, приходящаяся на сталь):

$$0{,}8 \frac{B_{ст}}{\mu_{ст}} l_{ст} = I \cdot w - 0{,}8 B_в \cdot l_в = 1\,010\ a.$$

Подставляя известные значеиия $B_{ст}$ и $l_{ст}$, напишем:

$$0{,}8 \frac{16\,000\ гс}{\mu_{ст}} 50\ см = \frac{640\,000}{\mu_{ст}} = 1\,010\ a,$$

откуда легко вычислить

$$\mu_{ст} = \frac{640\,000}{1\,010} = 635.$$

4-8. НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

При решении ряда задач, как это видно из только что приведенных примеров, очень большую роль играет величина $0{,}8B/\mu$ (в частности $0{,}8B_{ст}/\mu_{ст}$).

Этой величиной пользуются для многих расчетов и при целом ряде теоретических выводов. Эту величину называют напряженностью магнитного поля и обозначают буквой H («аш» или «ха»):

$$H = \frac{0{,}8B}{\mu} = \frac{B}{1{,}25\mu}.$$

Множитель $0{,}8 = 1/1{,}25$ выбран так, чтобы при подстановке в формулу значений индукции, выраженных в гауссах, левая часть давала бы значения напряженности поля, выраженные в амперах на сантиметр (*а/см*).

Существуют и другие единицы для индукции. Им будут соответствовать, конечно и другие множители перед $\frac{B}{\mu}$ в выражении напряженности поля. Так, выражая индукцию в вольт-секундах на 1 $см^2$, а H в *а/см*, мы должны ввести множитель $4\pi \cdot 10^{-9}$ в знаменатель

$$H\ (а/см) = \frac{B\ (в \cdot сек/см^2)}{4\pi \cdot 10^{-9}}.$$

Вспомнив определение магнитной проницаемости, легко увидеть, что в случае кольцевой катушки со сплошным сердечником

$$H = \frac{B_в}{\mu} = 1{,}25 I \cdot w / l,$$

т. е. напряженность поля в стальном кольце равна магнитной индукции в такой же кольцевой катушке, не содержащей ферромагнитных тел.

Заметим сразу же, что наша вторая формула справедлива только для замкнутых сердечников, имеющих форму кольца, охватывающего все витки катушки, да еще обязательно кольца с неизменным сечением и с одинаковыми свойствами по всей длине!

Напротив, первая формула для определения напряженности поля справедлива всегда.

На стр. 169 нами была получена формула

$$0{,}8B\left(\frac{l_{ст}}{\mu_{ст}} + l_в\right) = I \cdot w.$$

Введя обозначения

$$\frac{0{,}8B_{ст}}{\mu_{ст}} = H_{ст}$$

и

$$0{,}8B_в = H_в$$

(ведь в воздухе $\mu = 1$), мы перепишем ее в виде

$$H_{ст} \cdot l_{ст} + H_в \cdot l_в = Iw.$$

Полезно также разобрать и примеры предыдущего параграфа. Так, в примере 1, рассматривая сердечник с воздушным зазором, мы нашли, что полный ток $I \cdot w = 665$ *а* соответствует индукции 12 000 *гс* при проницаемости стали $\mu_{ст} = 2\,600$.

Вынув стальной сердечник, мы получим при том же токе напряженность поля

$$H = \frac{I \cdot w}{l} = \frac{665}{50} = 13{,}3 \text{ а/см}.$$

Ей соответствует магнитная индукция, равная всего лишь

$$B = 1{,}25H = 1{,}25 \cdot 13{,}3 = 16{,}6 \text{ гс}.$$

Обратившись еще раз к примеру 2 предыдущего параграфа, мы увидим, что в случае сплошного сердечника индукция в 12 000 *гс* создавалась полным током $I \cdot w = 185$ *а*. Такой же полный ток после удаления сердечника создает в воздухе индукцию

$$B_в = 1{,}25 \frac{I \cdot w}{l} = 1{,}25 \frac{185}{50} = 4{,}63 \ гс.$$

Пользуясь понятием напряженности поля, можно записать закон полного тока в такой форме:

$$\Sigma H\,(а/см) \cdot l\,(см) = I\,(а).$$

Здесь предполагается, что H выражено в *а/см*, l — в сантиметрах, I — в амперах.

Заметим, что величина, называвшаяся выше удельным полным током $I \cdot w_0$ и откладывавшаяся по горизонтальной оси магнитных характеристик (рис. 4-4 — 4-6), оказывается не чем иным, как напряженностью магнитного поля, выраженной в *а/см*.

В заключение заметим еще следующее: формула $H_{ст} \cdot l_{ст}$ может применяться и к сердечнику, имеющему форму, отличную от кольца, так как при большой проницаемости стали магнитный поток в основном следует за формой сердечника.

Пример. В прямоугольном стальном сердечнике из стали высокой проницаемости (рис. 4-6), изображенном на рис. 4-9, требуется создать индукцию 14 000 *гс*. По пути в сердечнике содержатся два воздушных зазора общей длиной 0,02 *см*. Размеры сердечника указаны на рис. 4-9.

Спрашивается, сколько ампер-витков должны создавать катушки, надетые на сердечнике.

Решение. Найдя по графику рис. 4-6 соответствующее 14 000 *гс* значение напряженности магнитного поля в сердечнике

$$H_{ст} = I \cdot w_0 = 8{,}5 \ а/см$$

и по формуле

$$H_в = 0{,}8 \ B = 0{,}8 \cdot 14\,000 = 11\,200 \ а/см$$

значение напряженности магнитного поля в воздушном зазоре, мы получаем для полного тока величину

$$I \cdot w = H_{ст} l_{ст} + H_в l_в = 8{,}5 \cdot 25 + 11\,200 \cdot 0{,}02 = 212 + 224 =$$
$$= 436 \ \text{ампер-витков}.$$

Этот пример еще раз показывает, какую роль играют даже очень малые зазоры.

Расчет магнитной цепи. Приведенные примеры являются простейшими расчетами магнитной цепи, т. е. цепи магнитного потока.

При более сложной форме сердечника поток может разветвляться (рис. 4-10). Кроме того, в таких случаях при вычислении для разных замкнутых контуров в правой части

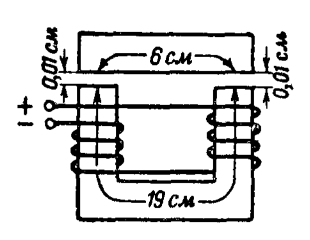


Рис. 4-9. Прямоугольный сердечник с воздушным зазором.

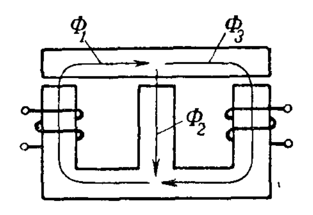


Рис. 4-10. Разветвленная магнитная цепь с двумя намагничивающими катушками.

нашей основной расчетной формулы (закон полного тока) могут оказаться разные значения полного тока.

Расчет очень осложняется. Однако и для такой более сложной цепи остается справедливым наш закон полного тока.

Добавочным уравнением для расчета сложных магнитных цепей является условие непрерывности магнитного потока: магнитный поток, приходящий к какому-нибудь узлу, где он разветвляется, равен сумме отходящих потоков. В случае, изображенном на рис. 4-10, это значит, что

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3.$$

Этот закон напоминает первое правило (первый закон) Кирхгофа для электрической цепи. Нетрудно усмотреть аналогию со вторым правилом Кирхгофа в законе полного тока

ΣIw аналогична Σ э. д. с.

На основании этой аналогии часто полный ток и называют магнитодвижущей силой (м. д. с.) или намагничивающей силой (н. с.).

4-9. НАМАГНИЧЕННОСТЬ

В конце § 4-2 поставлен вопрос о том, не объясняется ли большая индукция, наблюдаемая в железе и подобных ему телах, тем, что в них легче создается магнитное поле,

На этот вопрос было отвечено очень неопределенно: и да и нет.

Почему да, — было пояснено во всем последующем изложении, где было введено понятие магнитной проницаемости. Разъясним теперь вторую половину ответа. Почему мы сказали нет?

Многочисленные исследования магнитных явлений показали, что особенности железа и других ферромагнитных тел объясняются вовсе не какой-то их особенной проницаемостью или податливостью для магнитного поля.

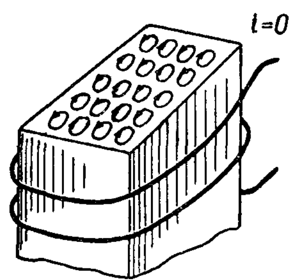


Рис. 4-11. Движение электрических зарядов изображено на рисунке маленькими кольцами токов. Эти микроскопические токи имеют разные направления и магнитное действие одних уравновешивается встречным действием других токов.

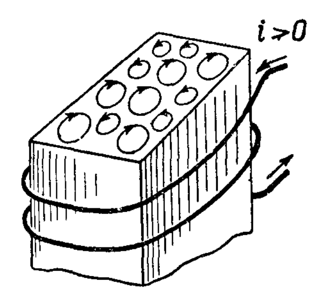


Рис. 4-12. То же, что на рис. 4-11, но только благодаря воздействию намагничивающего тока, проходящего по обмотке, теперь имеется явное преобладание микроскопических токов, имеющих такое же направление, как и внешний намагничивающий ток.

Нет. Особые магнитные свойства железа объясняются тем, что внутри железа существуют свои скрытые токи, обусловленные внутренним движением электрических частиц, входящих в состав атомов.

Эти скрытые микроскопические токи участвуют в создании магнитного поля наряду с обычными токами, протекающими в обмотках.

Доля, приходящаяся на эти токи, очень велика. Если обратиться к примеру 2, § 4-7, мы увидим, что 185 ампер-витков при наличии стального сердечника создали поле в 12 000 *гс*.

В примере 3 того же § 4-7 показано, что для создания такого же поля при отсутствии железа требовалось бы не 185, а 480 000 ампер-витков.

Теперь с новой точки зрения мы должны сказать, что разность между этими значениями ампер-витков, т. е. 480 000 — 185 = 479 815 ампер-витков, и приходится на долю скрытых токов, протекающих в намагниченном железе. Эти скрытые токи можно представить в виде маленьких кольцевых токов, как это показано на рис. 4-11 и 4-12.

Протекание этих токов не вызывает никакого нагрева вещества (закон Ленца — Джоуля здесь неприменим), так как собственное внутриатомное движение микроскопических зарядов происходит без трения.

До тех пор, пока тело находится в ненамагниченном состоянии, магнитное поле этих движущихся частичек незаметно, так как они движутся в самых различных направлениях и действие одних уравновешивается противодействием других (рис. 4-11). Но при воздействии на железо магнитного поля, созданного внешним током, в движение этих частичек вносится порядок: микроскопические токи, совпадающие с внешним намагничивающим током, теперь преобладают над токами, направленными по другому пути (рис. 4-12).

Когда в движении малых электрических частиц имеется упорядоченность, т. е. преобладает определенное направление в расположении микроскопических кольцевых токов, говорят, что вещество намагничено.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

5-1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ

Природа электрического заряда (электричества) долго оставалась неизвестной. Электричество уже нашло многочисленные практические применения, но что такое электрический заряд, движение которого образует электрический ток, оставалось неясным. Не есть ли электричество особое вещество или, как говорят химики, особый элемент, такой как медь, кислород и т. п.? Ставился и такой вопрос.

Атомы, электроны, ионы. В настоящее время на основании многочисленных исследований, оправдавшихся догадок и тонких опытов твердо установлено, что в состав всех обычных физических тел входят мельчайшие частицы, обладающие электрическим зарядом. Каждый атом — самая мелкая частица любого элемента (легчайшего газа — водо-

рода, угля, металлов, тяжелого урана и др.) — состоит из ядра, обладающего положительным электрическим зарядом, и электронов, образующих его оболочку и движущихся вокруг ядра (рис. 5-1). Электроны обладают отрицательным электрическим зарядом. Общий отрицательный заряд оболочки атома равен положительному заряду ядра: —1 и +1 в атоме водорода, —6 и +6 в атоме углерода, —29 и +29 в атоме меди и т. п. Здесь за меру электрического заряда принят заряд электрона.

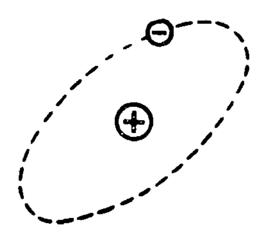


Рис. 5-1. Модель простейшего атома — атома водорода.

В середине изображено положительное ядро атома (протон). Вокруг него движется частица, обладающая отрицательным зарядом (электрон). Заряды протона и электрона отличаются только знаком — по абсолютной величине они одинаковы (как +1 и —1). Но протон примерно в 1 800 раз тяжелее электрона — он обладает в 1 800 раз большей массой.

Благодаря одинаковому количеству положительного и отрицательного электричества в атоме атом в целом кажется не обладающим зарядом — действие положительного заряда уравновешивается действием отрицательного. Целый атом, как говорят, электрически нейтрален — он не положителен и не отрицателен.

Великий русский ученый Д. И. Менделеев, исследуя свойства различных элементов, расположил их в определенном порядке в таблице (знаменитая таблица Менделеева) и приписал каждому элементу свой порядковый номер (от 1 до 92) *.

Порядковый номер элемента соответствует положительному заряду ядра и числу электронов в его оболочке.

Все наблюдаемое многообразие многих миллионов различных веществ, обладающих самыми разнообразными свойствами, образуется из различных соединений простых элементов (их около сотни).

В сложных телах атомы различных элементов соединяются в группы, называемые молекулами; так, молекула воды состоит из устойчивого соединения двух атомов водорода с одним атомом кислорода. Часто и внутри простых элементов однородные атомы соединяются в молекулы (например, в водороде два атома образуют устойчивую молекулу водорода).

* В самые последние годы в связи с изучением проблемы атомной энергии были найдены элементы, имеющие более высокие порядковые номера, чем уран, занимающий девяносто второе место.

Под влиянием различных физико-химических воздействий оболочка атома может терять часть электронов. К оболочке атома могут присоединяться и лишние электроны. В обоих случаях общий заряд атома (или образованной ими молекулы) уже не равен нулю, — атом (или молекула) перестает быть нейтральным. Такие атомы (или молекулы) называют ионами. Положительный ион — это атом, потерявший один или несколько электронов. Отрицательный ион — это атом, к оболочке которого присоединились лишние электроны.

Заметим, что потеря электронов в оболочке легко восполняется — освободившееся место легко занимают приходящие извне электроны. То же самое можно сказать и о лишних электронах. Потеря или приобретение лишних электронов — ионизация — не меняет основных свойств атома. Ионизированный атом кислорода или меди остается все же атомом именно кислорода или, соответственно, меди. Напротив, изменение заряда атомного ядра сопряжено с глубочайшими изменениями всего атома. Такие изменения наблюдаются только при ядерных реакциях, связанных с превращением одного элемента в другой. Обычно такие превращения сопровождаются исключительно большими изменениями энергии атома[1].

5-2. ИЗОЛЯТОРЫ И ПРОВОДНИКИ

Электрические свойства различных тел прежде всего определяются тем, насколько свободно в них могут передвигаться электрические заряды.

В изолирующих телах (таких, как фарфор, масло, смола, бумага) электрические заряды занимают определенное положение и не могут свободно перемещаться. Свободное движение зарядов не может происходить и в газах, если большинство его молекул и атомов находится в нейтральном состоянии. В обычном состоянии газы (в том числе и воздух) являются хорошими изоляторами, так как лишь ничтожное количество его частиц находится в ионизированном состоянии.

В растворах солей, щелочей и кислот (электролиты) атомы соединяются в группы, обладающие положительным

[1] Получение так называемой атомной энергии основано на искусственном возбуждении ядерных реакций, тогда как ранее известные способы получения энергии, например путем сжигания топлива, основаны на химических реакциях, в которых атомы разных веществ, оставаясь неизменными, лишь по-разному соединяются между собой.

или отрицательным зарядом («+» и «—» ионы). Протекание тока через такие растворы обусловлено подвижностью ионов и обязательно сопровождается переносом атомов от одного электрода к другому. В металлах электроны могут легко перемещаться между положительными ионами, образующими жесткий костяк тела (кристаллическая решетка из связанных между собой ионов). В какой-то мере свободные электроны внутри металла похожи на жидкость, заполняющую пористое губчатое тело. Протекание тока через металл, обусловленное движением электронов, не сопряжено с переносом атомов: если, например, в цепь тока, образованного медными проводами, вставить кусок проволоки из другого металла, скажем, из серебра, то сколь бы долго по такой цепи ни проходил ток, атомы меди не войдут в серебряную проволоку и атомы серебра не войдут в медную.

Электроны в медной и серебряной проволоках одинаковы, поэтому их переход из одной в другую не связан с наблюдением каких бы то ни было химических изменений.

Заметим здесь, что заряды (электроны и ионы) при протекании даже больших токов движутся сравнительно медленно, — огромная скорость распространения электромагнитного состояния вдоль проводов электрической цепи совпадает со скоростью распространения электромагнитной волны, а не со скоростью движения заряда в проводах.

Электролиты и металлы — хорошие проводники, их удельное сопротивление очень мало.

Хорошими проводниками являются и многие газы (в том числе и воздух), но только тогда, когда их атомы (или молекулы) находятся в ионизированном состоянии. В ионизированном газе электроны, вырванные из атомных оболочек, могут свободно передвигаться между положительными ионами (рис. 5-2).

Ионизация газа может быть вызвана разными причинами.

Введем внутрь стеклянной трубки, заполненной разреженным газом, металлические электроды (проволоки, пластины) и присоединим их к источнику достаточно высокого напряжения.

Если напряжение постепенно увеличивать, то легко заметить, что сначала ток в цепи чрезвычайно мал, но как только напряжение достигнет известного предела, ток резко возрастет. Это и значит, что произошла ионизация газа. В тот момент, когда через трубку с газом начал протекать ток, газ в трубке начнет светиться. Трубка зажглась.

Свечение газа обусловлено сильной и непрерывной ионизацией его. Атомы излучают свет, когда электроны отрываются от одних атомов и затем соединяются с другими или даже меняют свое положение внутри атомной оболочки.

В рассмотренном случае ионизация вызвана электрическим напряжением.

Ионизацию газа вызывает и свет. Особенно сильная ионизация наблюдается при освещении газа кварцевой лампой. Еще сильнее ионизируют газ рентгеновские лучи. Обычный окружающий нас воздух также содержит небольшое число ионизированных атомов.

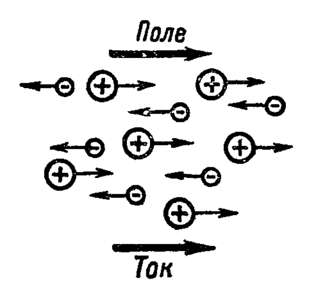


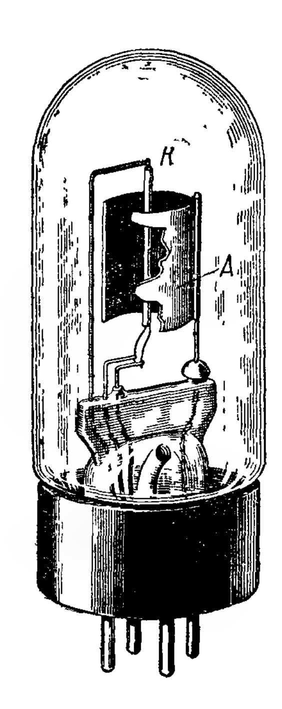
Рис. 5-2. Схематическое изображение тока в ионизированном газе.

Тяжелые положительные ионы передвигаются в направлении силы электрического поля (§ 5 3). Легкие более подвижные электроны движутся навстречу Важно обратить внимание на то, что общий заряд газа при этом может быть равен нулю (одинаковое количество отрицательных и положительных зарядов)

Испускание электронов металлами. Нагретые металлы испускают в окружающую их среду свободные электроны. Тепловое испускание электронов похоже на испарение нагретой жидкости. При нагревании увеличивается скорость движения частиц, образующих нагреваемое тело. При высокой температуре скорость движения отдельных частиц (в том числе и электронов) настолько возрастает, что эти частицы, преодолевая сдерживающие силы, вылетают наружу.

Испускание свободных электронов легче всего наблюдать, когда нагреваемый металл помещен в трубку с откачанным из нее воздухом (если испускаемые электроны попадают в воздух, они быстро теряют подвижность, сталкиваясь с частицами газа).

Легко произвести такой опыт: возьмем одну из электронных ламп (рис. 5-3) с двумя впаянными в стекло электродами и включим ее в цепь источника последовательно с миллиамперметром (рис. 5-4). Ток в электрической цепи не пойдет до тех пор, пока один из электродов не будет подогрет. Для подогрева предусмотрена специальная проволочка, нагреваемая током от дополнительного источника. Если нижний электрод — называемый катодом—разогреть, то он начнет испускать электроны. Электроны, свободно пробегая внутри трубки по безвоздушному пространству



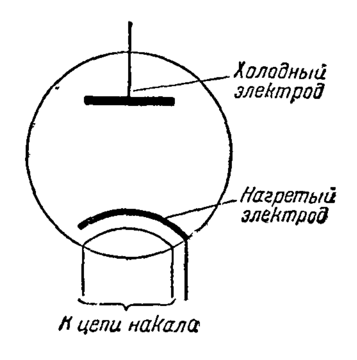


Рис. 5-3. Электронная лампа с двумя электродами и с цепью для подогрева. Показанная лампа применяется для выпрямления тока.

Справа — внешний вид лампы, слева—ее электрическая схема.

(в вакууме), переходят от нижнего отрицательного электрода к верхнему положительному электроду (к аноду). Миллиамперметр отклонится, показывая, что в цепи установился электрический ток.

Справа на рис. 5-4 изображена цепь электронной лампы, в которой изменена полярность источника. В такой цепи тока не будет — электроны, вылетающие из нижнего электрода (положительного), притягиваются к нему элек-

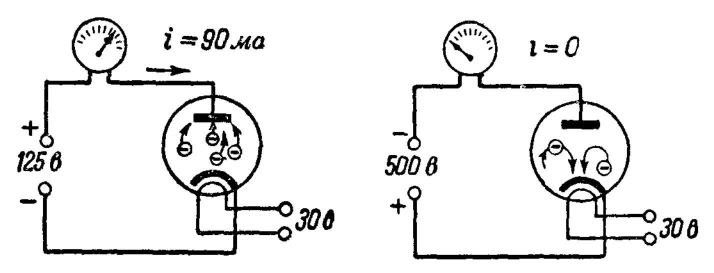


Рис. 5-4. Включение в цепь электронной лампы рис. 5-3.

Через лампу проходит ток, если нижний электрод подогрет и соединен с отрицательным полюсом источника. При изменении порядка присоединения полюсов через лампу ток не проходит, несмотря на то, что напряжение увеличено в 4 раза

трическими силами. Вылетевшие электроны возвращаются обратно, если накален положительный электрод. Электронная лампа проводит ток только в одном направлении (см. § 2-17, а также § 9-1).

Испускание электронов поверхностью металла происходит также при освещении металла светом, — чем сильнее свет, падающий на поверхность металла, тем больше электронов вырывается с его поверхности.

Первое обстоятельное исследование воздействия света на образование свободных электронов (фотоэффекта) было произведено в Москве проф. А. Г. Столетовым в 1888 г. Открытие фотоэффекта нашло себе применение в устройстве фотоэлементов—элементов электрической цепи, проводимость которых зависит от их освещения.

В настоящее время в электротехнике широко применяются электронные и ионные приборы. Мы еще вернемся к рассмотрению некоторых из них, а сейчас перейдем к описанию нескольких простых опытов с неподвижными (статическими) зарядами. Эти классические опыты позволили установить ряд основных законов.

Рассмотрение этих опытов должно внести ясность в понимание важнейших положений науки об электричестве.

5-3. ПРОСТЕЙШИЕ ОПЫТЫ С НЕПОДВИЖНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЗАРЯДАМИ (ЭЛЕКТРОСТАТИКА)

Уже на протяжении нескольких столетий известно, что существуют положительные заряды и заряды отрицательные.

В старину (еще в древней Греции) умели получать электрические заряды, натирая смолу шерстью, на смоле получали отрицательный заряд, заряд противоположного знака получался на шерсти. Очень сильно электризуется ископаемая смола — янтарь. От греческого наименования янтаря (электрон) произошло и современное слово электричество.

Если натереть стекло кожей или шелком, на стекле появится положительный заряд. В свое время так и говорили: смоляное электричество и противоположное ему — стеклянное.

Разноименные заряды притягиваются, одноименные отталкиваются. В этом легко убедиться на опыте, подвешивая, например, на шелковых нитях легкие пробковые шарики и сообщая им электрические заряды посредством прикосновения к ним натертым стеклом или смолой (рис. 5-5).

Стремление одноименных зарядов оттолкнуться один от другого приводит к тому, что заряды, сообщенные проводящему телу, всегда располагаются на их поверхности.

Шарики, подвешенные на сухих шелковых нитях, могут очень долго удерживать заряд, если они окружены сухим воздухом, — это показывает на то, что и шелк, и воздух — хорошие изоляторы. Но зажгите спичку и проведите ею под шариками, отталкивающимися (или притягивающимися один к другому), — шарики свободно повиснут на нитях. Пламя ионизировало воздух, и заряды стекли с шариков.

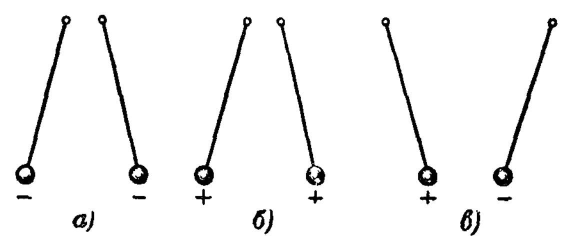


Рис. 5-5. Легкие шарики, подвешенные на шелковых нитях, отталкиваются, если они заряжены одинаковым электричеством (+ и + или — и —). Шарики взаимно притягиваются, если они заряжены различно (+ и —).

То же самое произошло бы, если осветить пространство между шариками электрической дугой или кварцевой лампой.

Из опытов, подобных изображенным на рис. 5-5, можно сделать важное заключение:

1) Сила взаимного отталкивания или притяжения между зарядами возрастает с увеличением зарядов (при удвоении одного заряда сила удваивается, при удвоении каждого из зарядов сила возрастает в четыре раза).

2) Эта силы убывает с увеличением расстояния, если расстояние между зарядами увеличить вдвое, то сила уменьшится в четыре раза.

Сказанное носит название закона Кулона.

Действие положительного заряда может быть уравновешено действием заряда отрицательного (рис. 5-6), поэтому, когда в одном теле заключены отрицательные и положительные заряды, их общее действие сводится к нулю.

Разъясним еще одно интересное явление: натертый янтарь или другое электризованное тело притягивает легкие

тела — кусочки бумаги, соломинки и т. п. Это объясняется тем же притяжением разноименных зарядов и отталкиванием одноименных. В клочке бумаги происходит смещение зарядов: положительные заряды стремятся приблизиться к отрицательному заряду заряженного тела, а отрицательные заряды стремятся отодвинуться от него. Но положительные заряды испытывают бо́льшую силу, так как они ближе расположены к отрицательным зарядам большого тела (рис. 5-7).

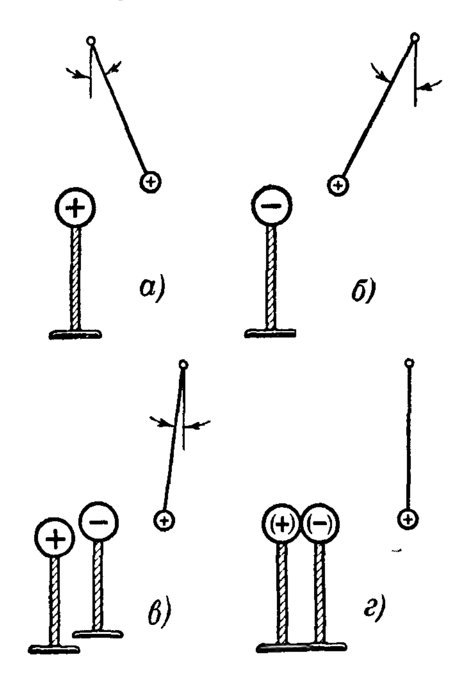


Рис. 5-6. Действие положительного и отрицательного зарядов ваимно уравновешивается (нейтрализуется).

Последовательность опытов такая: *а* и *б* — к заряженному шарику, подвешенному на нити, по очереди подносятся положительно и отрицательно заряженные шары, укрепленные на стеклянных трубках (трубки должны быть совершенно чистыми и сухими, шары имеют тонкую металлическую оболочку); заряды больших шаров подбираются такими, чтобы при одинаковом расстоянии между большим шаром и маленьким нить отклонялась на одинаковый угол; *в* — оба заряженных шара приближаются к маленькому пробному шарику — теперь он почти не отклоняется (он немного притягивается к большим шарам, так как он ближе к отрицательно заряженному); *г* — когда большие шары приведены в соприкосновение, они перестают оказывать действие на маленький шарик.

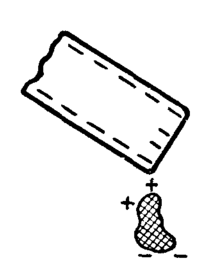


Рис. 5-7. Легкий кусочек папиросной бумаги притягивается к отрицательно заряженному сургучу. Заряды в бумаге сместились — положительные в одну сторону, отрицательные — в другую.

Притяжение заряженных частиц к другим заряженным телам находит практическое применение в очистке газов от пыли и дыма. Помещая тонкие изолированные друг от друга проволоки в пространство, заполненное дымом, легко наблюдать его исчезновение, после того как к проволокам приложено высокое напряжение.

5-4. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Нетрудно увидеть сходство во взаимодействии зарядов и магнитов (ср. гл. 3). Электрические заряды взаимодействуют на расстоянии — значит, электрические свойства заключены не только в заряженных телах, но и в окружающем их пространстве. Из этого мы делаем заключение, что

в пространстве, окружающем заряды, существует электрическое поле.

Электрическое поле, как и поле магнитное, — это один из видов материи, одна из форм ее проявления. Между электрическим и магнитным полем много общего, это как бы разные стороны одного и того же электромагнитного поля.

В электрическом поле заключена энергия, за счет энергии электрического поля и производится работа, связанная с перемещением электрических зарядов.

Напряженность электрического поля. В одной и той же точке электрического поля разные заряды будут испытывать разные силы. Если вдвое увеличить заряд, то вдвое увеличится и сила, испытываемая зарядом: на заряд q_0 действует сила f_0; помещая в ту же область поля заряд $2q_0$ (два заряда q_0+q_0), мы получим силу $2f_0$ (сила f_0+f_0).

Сила, действующая на положительный заряд (q_0), прямо противоположна силе, действующей на такой же отрицательный заряд ($-q_0$).

Но один и тот же заряд в разных точках электрического поля может испытывать разные силы. Силы могут отличаться как по направлению, так и по величине. Это значит, что электрическое поле может быть сильнее или слабее; это значит, что электрическое поле может иметь различные направления.

Сила электрического поля определяется его напряженностью.

Направление напряженности поля совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, помещенный в поле.

Количественное значение напряженности поля определяется отношением силы f к величине заряда q

$$\textit{напряженность}\ (E)=\frac{\textit{сила}\ (f)}{\textit{заряд}\ (q)}.$$

Единицы измерения заряда и электрического поля. Силу f будем измерять в ньютонах[1]. Заряд q будем выражать в ампер-секундах или кулонах:

$$1 \text{ кулон} = 1 \textit{ асек}.$$

Заряд в один кулон проходит за одну секунду через поперечное сечение проводника при постоянном токе в один ампер.

В таком случае напряженность поля окажется выраженной в вольтах на метр. Напряженность поля можно, конечно, выражать и в вольтах на сантиметр, в киловольтах на миллиметр и т. п.

Заряд в один кулон это очень большая величина.

Чтобы получить заряд в 1 *к*, нужно взять приблизительно 6 миллиардов миллиардов электронов ($6{,}25 \cdot 10^{18}$). Такое количество электронов легко привести в движение внутри проводника, содержащего огромное количество атомов (например, в каждом грамме меди содержится $95 \cdot 10^{21}$ атомов!). Но получить такой заряд, собрав отдельно положительные ионы или электроны, практически невозможно.

На рис. 5-8 показана часть лабораторной установки высокого напряжения; числовые данные, приведенные в подписи под фигурой, характеризуют некоторые количественные соотношения между зарядом, напряжением и напряженностью поля.

Электрическая прочность. Наибольшая напряженность поля, допускаемая в электротехнических установках, определяется электрической прочностью изоляции. Как только напряженность поля достигнет определенной величины, происходит пробой изоляции, — материал, из которого выполнена изоляция, начинает проводить ток, протекание большого тока при этом приводит к полному нарушению изолирующих свойств: через воздух проскакивают искры и может возникнуть электрическая дуга, фарфор оплавляется и растрескивается, бумага и резина обугливаются и могут, конечно, воспламениться. Электрический пробой воздуха происходит при напряженности поля 30 *кв/см*.

На рис. 5-9 показана картина электрического пробоя: электрический разряд произошел на поверхности изоляторов и перешел в дугу, горящую в воздухе.

[1] Напомним, что 1 ньютон=0,102 килограмм-силы. 1 ньютон способен сообщить массе в 1 *кг* ускорение в 1 *м/сек* за секунду.

В технике высоких напряжений применяют ряд специальных изолирующих материалов, обладающих большой электрической прочностью. Большой прочностью обладают слюда, фарфор, минеральное масло и др.

Атмосферное электричество. Даже в обычных условиях в воздухе над поверхностью земли существует небольшое

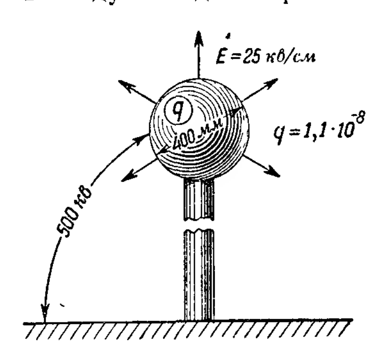


Рис. 5-8. Шар, имеющий металлическую поверхность, поставлен на изолирующий столб и ему сообщено напряжение 500 *кв* (тыс. вольт) по отношению к поверхности земли.

Диаметр шара 400 *мм*. Напряженность поля на поверхности шара 25 *кв/см* (тыс вольт на 1 *см*). Заряд шара $1{,}1\cdot10^{-8}$ *к* или $6{,}9\cdot10^{10}$ электронов, т. е. 69 млрд. электронов (приблизительно одна стомиллионная доля кулона). Заряд распределен на поверхности шара. Если увеличить напряжение до 600 *кв*, произойдет электрический разряд: напряженность поля достигнет 30 *кв/см* и воздух потеряет свои свойства изолятора.

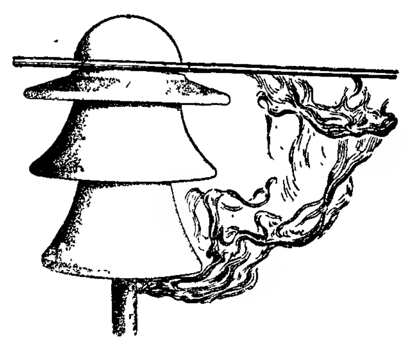


Рис. 5-9. Электрический разряд на поверхности изолятора.

электрическое поле, резко увеличивающееся во время грозы. Грозовые разряды — молнии — вызваны электрическим полем грозовых туч. В них происходит под действием потоков воздуха (ветра) разделение положительно и отрицательно заряженных капелек воды и скопление зарядов разного знака в разных областях тучи.

Электрическая природа грозовых явлений была установлена М. В. Ломоносовым, гениальным ученым XVIII века, основоположником многочисленных отраслей науки и техники.

Электрическое поле в проводящей среде. Электрическое поле может существовать не только в изолирующей, но и в проводящей среде. Но, как уже говорилось, в проводниках заряды могут перемещаться под действием приложенных к ним сил. Значит, существование поля в проводниках обязательно связано с движением зарядов или, говоря другими словами, с протеканием электрического тока.



Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1764 гг.).

Плотность тока в одной и той же проводящей среде *тем больше, чем больше напряженность поля.* При одной и той же напряженности поля в разных средах установятся и разные плотности тока — тем бо́льшие, *чем больше проводимость среды.*

Очень важно заметить следующее. Под действием электрического поля *электроны в вакууме движутся с ускорением.* Вспомните, что сила пропорциональна именно ускорению; так, под действием постоянной силы тяжести все свободно падающие тела двигаются все скорее и скорее.

Напротив, *в проводящей среде* при постоянной напряженности поля электроны (или другие заряженные частицы) *движутся с постоянной скоростью* (и сравнительно небольшой). Это похоже на движение под действием механической силы при наличии встречных сил трения. Так, при падении с раскрытым парашютом скорость, достигнув определенной величины, бо́льше не увеличивается — в этом случае сила сопротивления воздуха уравновешивает силу тяжести. Точно так же камень, опускаясь на дно в глубокой воде, движется примерно с постоянной скоростью. С постоянной скоростью будет итти и груженый поезд, несмотря на постоянную и большую силу тяги паровоза: это объясняется тоже тем, что сила тяги уравновешивается силой трения в колесах движущегося железнодорожного состава.

Работа силы во всех рассмотренных примерах переходит в тепло, выделяющееся в трущихся телах. То же самое происходит и в обычных проводниках. Движение зарядов тормозится из-за взаимодействия с другими частицами вещества.

В проводящих телах *работа сил поля* идет не на ускорение движения заряженных частиц, а на преодоление сил трения. Эта работа и *превращается в тепло* в соответствии с законом Ленца—Джоуля.

Заметим в заключение, что при движении зарядов в *вакууме работа*, затраченная полем, превращается в энергию *движения* летящих зарядов. Эта энергия отдается электродам при ударе о них. Под действием этих ударов электроды нагреваются. При ударе о металл очень быстро летящих электронов испускаются лучи, похожие на свет, но не видимые глазом и отличающиеся способностью просвечивать многие тела, не прозрачные для обычного света. Эти лучи получили название рентгеновских лучей — по имени открывшего их немецкого ученого.

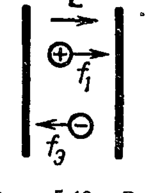


Рис. 5-10. Вычисление напряженности поля по силе, испытываемой зарядом.

Пример 1. Определить, чему равна напряженность поля между двумя разноименно заряженными пластинами, если маленький заряд

$$q_1 = 5 \cdot 10^{-14} \text{к}$$

испытывает силу

$$f_1 = 1{,}02 \cdot 10^{-5} \text{ грамм-сила}$$

(см. рис. 5-10)

Решение. Зная силу и заряд, находим напряженность поля E по формуле

$$E\,(в/м) = \frac{f_1\,(\text{ньютон})}{q_1\,(\text{кулон})} = \frac{1 \cdot 10^{-7}\ \text{ньютон}}{5 \cdot 00^{-14}\ \text{кулон}} =$$

$$= 2 \cdot 10^6\ в/м, \text{ или } 2 \cdot 10^4\ в/см, \text{ или } 20\ кв/см;$$

здесь сила f_1 переведена из граммов в ньютоны (1 ньютон равен 102 *г*);

$$f_1 = 1{,}02 \cdot 10^{-5}\ г\ \frac{1}{102\ г/\text{ньютон}} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ ньютона.}$$

Пример 2. Какую силу испытывает электрон, находящийся в поле тех же пластин?

Мы уже знаем, что напряженность поля составляет 20 *кв/см*. Мы знаем также, что один электрон имеет заряд

$$e = \frac{1\ к}{6{,}25 \cdot 10^{18}} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ к.$$

Значит, сила, испытываемая электроном,

$$f_э\,(\text{ньютон}) = E\,(в/м) \cdot e\,(\text{кулон}) = 2 \cdot 10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} =$$

$$= 3{,}2 \cdot 10^{-13} \text{ ньютона.}$$

Эта сила, конечно, чрезвычайно мала, но электрон обладает и чрезвычайно малой массой.

Масса электрона $= 9{,}1 \cdot 10^{-28}$ *г*, или $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ *кг*. Поэтому ускорение, испытываемое электроном под действием вычисленной силы, в свою очередь чрезвычайно велико

$$ускорение = \frac{сила}{масса}.$$

Подставляя в эту формулу значения силы в ньютонах, а массы в килограммах, получим ускорение выраженным в метрах в секунду за секунду (*м/сек²*):

$$ускорение = \frac{3{,}2 \cdot 10^{-13}\ \text{ньютона}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ кг} = 3{,}5 \cdot 10^{17}\ м/сек^2.$$

Значение ускорения действительно огромно. Это значит, что электрон, даже очень быстро пролетающий между пластинами, сильно отклонится под действием электрического поля.

Сила, действующая на электрон, конечно имеет направление, противоположное силе, действующей на положительный заряд.

5-5. НАПРЯЖЕНИЕ (РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ)

Мы знаем, что работа, совершаемая силой, равна произведению силы на перемещение в направлении этой силы[1]:

$$A = f \cdot l_{(f)};$$

в этой формуле длина пути обозначена буквой l, значок (f) поставлен для того, чтобы подчеркнуть, что речь идет о перемещении в направлении силы.

Работа, совершаемая при переносе заряда под действием сил поля, тоже равна произведению силы на путь, пройденный в направлении напряженности поля. Но сила, действующая на заряд, равна произведению заряда и напряженности поля, а это значит, что работу электрических сил можно выразить такой формулой:

$$работа = заряд \times напряженность \times путь;$$

здесь опять же речь идет о пути, пройденном в направлении силы. Пользуясь буквенными обозначениями, ту же формулу можем записать в таком виде:

$$A = q \cdot E \cdot l_{(E)};$$

здесь l — длина пройденного пути, значок (E) поставлен для подчеркивания того, что имеется в виду перемещение в направлении, совпадающем с напряженностью поля (а значит, и с силой).

---

[1] Если силы на разных участках пути различны, мы можем определить работу как сумму таких же произведений, взятых на отдельных участках пути, в пределах которых силу можно считать неизменной.

Работу, совершаемую полем при переносе единичного заряда, называют электрическим напряжением

(никогда не смешивайте двух разных понятий: напряжение и напряженность).

Значит, для того, чтобы найти напряжение, нужно разделить работу, совершенную при переносе q единиц заряда, на число q. Производя деление на q обеих частей последнего равенства, мы получим, что

напряжение (U) = *напряженность* $\times$ *путь,*

или

$$U = \frac{A}{q} = E \cdot l_{(E)}.$$

Как при словесной, так и при буквенной записи этой формулы имеется в виду перемещение в направлении напряженности поля.

Если заряд измерять в кулонах, а напряженность поля и путь в *в/м* и метрах (или соответственно в *в/см* и сантиметрах), то в левой части мы получим напряжение, выраженное в вольтах.

Легко убедиться в том, что данное здесь определение напряжения полностью совпадает с ранее принятым. В самом деле, если между двумя электродами имеется напряжение и с одного из них (+) на другой (—) за каждую секунду переносится заряд q, это значит, что за каждую секунду совершается работа

$$A \text{ (в секунду)} = U \cdot q \text{ (в секунду)}.$$

Но по самому определению количество электричества, переносимое за секунду, мы называли током (I):

$$q \text{ в секунду} \quad I,$$

а работу, совершаемую в секунду, мы называли мощностью (P).

Значит,

$$A \text{ в секунду} = P.$$

Поэтому при переносе зарядов силами поля мощность

$$P = U \cdot I.$$

Формулу для определения напряжения через напряженность поля (через силу поля)

$$U = E \cdot l_{(E)}$$

мы можем применять, конечно, только в том случае, когда, во-первых, напряженность остается постоянной вдоль всего пути $l_{(E)}$ и когда, во-вторых, перемещение всюду совпадает с направлением напряженности.

Если поле неоднородно, приходится применять более сложную формулу

$$U = \Sigma E \cdot l_{(E)};$$

здесь знаком Σ обозначена сумма произведений E и $l_{(E)}$, каждое из которых вычисляется для отдельных участков поля. Эти участки всегда можно сделать такими маленькими, чтобы без особой погрешности можно было брать среднее значение напряженности поля на этом участке.

Разность потенциалов и потенциал. В поле, созданном неподвижными или медленно движущимися электрическими зарядами, всегда можно считать, что работа перемещения заряда из одной точки поля в другую не зависит от пути, по которому перемещается заряд. Эта работа зависит только от начального и конечного положений заряда (и, конечно, от величины переносимого заряда).

Поэтому всем точкам поля можно приписать некоторые характерные значения, называемые потенциалами и обладающие таким свойством: при переносе единичного заряда из одной точки поля в другую совершается работа, равная разности потенциалов между этими точками.

Обозначим потенциалы точек *1* и *2* соответственно буквами $П_1$ и $П_2$. В таком случае силы поля при переносе заряда из первой точки во вторую совершают работу

$$A = (П_1 - П_2)\, q.$$

Потенциалы выражаются в вольтах. Нетрудно заметить, что определение, которое здесь дано, относится не столько к потенциалу поля, сколько к разности потенциалов.

Это естественно, так как все физические процессы зависят именно от разности потенциалов. Если бы мы в последней формуле добавили к значениям $П_1$ и $П_2$ по одинаковой величине $П_0$, то от этого, конечно, их разность не изменилась.

В большинстве случаев за нулевой потенциал принимают или потенциал земли, или потенциал любой точки, находящейся за пределами поля.

Пример 1. Расстояние между заряженными пластинами, рассмотренными в примерах предыдущего параграфа, равно 2 *см*, поле можно считать однородным и направленным от положительной пластины к отрицательной. Чему равна разность потенциалов между пластинами.

Зная связь между напряжением и напряженностью поля

$$U = El_{(E)},$$

принимая во внимание сказанное о характере поля и, наконец, зная значение напряженности

$$E = 20 \text{ кв/см}$$

(оно было вычислено в примере 1 предыдущего параграфа), находим,

$$U = 20 \text{ кв/см} \cdot 2 \text{ см} = 40 \text{ кв}.$$

Но напряжение и равно искомой разности потенциалов

$$П_+ - П_- = 40 \text{ кв}$$

($П_+$ — это потенциал положительно заряженной пластины, $П_-$ — потенциал пластины, заряженной отрицательным электричеством).

Пример 2. Полагая, что в предыдущем примере посередине между пластинами потенциал равен нулю, найти потенциалы положительной и отрицательной пластин.

Ответ

$$П_+ = 20 \text{ кв и } П_- = -20 \text{ кв}.$$

5-6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ТЕЛ. ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Целый ряд приборов для измерения напряжения, а также для измерения заряда, основан на силах электростатического происхождения. На рис. 5-11 показан такой вольтметр для измерения сравнительно высокого напряжения.

Особенность и преимущества электростатических вольтметров заключаются в очень высоком внутреннем сопротивлении; при постоянном токе оно равно сопротивлению его изоляции.

Показание таких вольтметров не зависит от того, к какому из его зажимов присоединен положительный, а к какому отрицательный полюс источника.

Стрелочные электростатические вольтметры изготовляются и на более низкие напряжения (порядка сотни вольт). В этом случае вместо одной пластины делается

целый ряд подвижных пластин, взаимодействующих с рядом пластин неподвижных.

При необходимости измерять высокие напряжения в цепях переменного тока наряду с электростатическими вольтметрами пользуются обычными вольтметрами с трансформаторами напряжения (см. § 11-6).

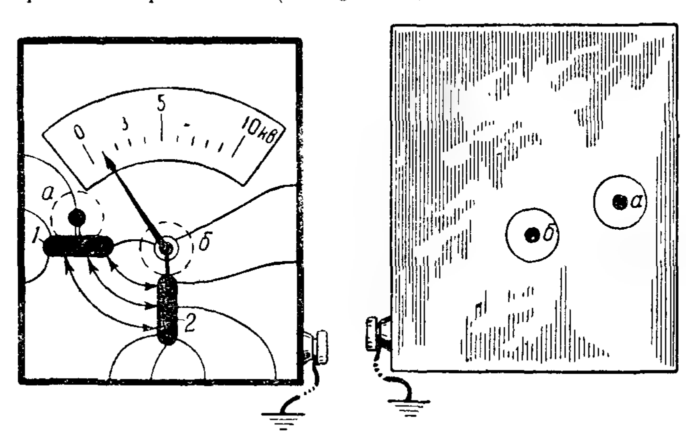


Рис. 5-11. Электростатический вольтметр, рассчитанный на высокое напряжение (10 *кв*). Слева схематически показано его устройство.
1 — неподвижная пластина; *2* — подвижная пластина, связанная с указателем (стрелкой). Измеряемое напряжение подается на пластины через изолированные штыри *а* и *б*. Пунктиром (тоже схематически) показаны силовые линии поля. Линии, снабженные стрелками, относятся к области поля, обусловливающем взаимное притяжение пластин. Чем больше напряжение, тем сильнее притягиваются пластины. Силы притяжения уравновешиваются собственным весом отклоняемой пластины. Справа показана обратная сторона вольтметра с изолированными штырями *а* и *б*, проходящими через стеклянные пластины. Металлический корпус вольтметра снабжен специальным зажимом для его заземления. Этот зажим соединяется проводом с забитыми в землю трубами—тем самым обеспечивается безопасность, так как корпус вольтметра принужденно получает потенциал земли.

В лабораторной практике для измерения высоких напряжений часто пользуются искровыми разрядниками: измеряемое напряжение подводится, например, к двум шарам, которые сближаются до тех пор, пока отделяющий их воздушный промежуток не будет пробит, — пока между шарами не проскочит искра. Для ограничения тока, протекающего после пробоя воздуха, последовательно с измерительными шарами включают очень большое сопротивление.

5-7. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ

Рассмотрим более подробно электрическое поле, заряды и разность потенциалов (напряжение) в системе двух заряженных тел, отделенных друг от друга изоляцией.

При этом будем все время считать, что заряд одного тела равен и противоположен заряду другого тела. Это последнее условие всегда выполняется, если заряд этим двум телам сообщается посредством их соединения с разными полюсами одного и того же источника напряжения: вспомним, что наши электрические генераторы не создают электрические заряды, а только разделяют их. На рис. 5-12 в качестве таких двух тел изображены две параллельные металлические пластины с малым расстоянием между ними.

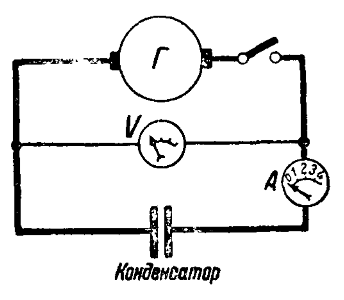


Рис. 5-12. Две параллельные изолированные металлические пластины присоединены к источнику напряжения. Эти пластины образуют простейший конденсатор.

Мы знаем, что чем больше заряд, тем больше сила создаваемого им поля. Но, увеличивая напряженность поля, мы, конечно, увеличиваем и напряжение: чем больше сила, тем больше и работа, если, конечно, путь остался прежним.

Из сказанного мы можем сделать такое заключение: рассматривая любую пару разноименно заряженных изолированных тел, мы найдем, что в любой точке их поля напряженность прямо пропорциональна их заряду. Но это значит, что и напряжение между ними (разность потенциалов) прямо пропорционально заряду.

Отношение заряда q к напряжению U, остающееся неизменным для данной пары изолированных тел, называется их электрической емкостью

$$\textit{емкость} = \frac{\textit{заряд}}{\textit{напряжение}}.$$

Принятое буквенное обозначение емкости C. Пользуясь им, можем написать такую формулу:

$$C = \frac{q}{U}.$$

В случае параллельных пластин емкость тем больше, чем больше площадь пластин и чем меньше расстояние между пластинами.

В самом деле, увеличивая только площадь пластин, мы увеличиваем область, занятую полем. Если при этом раз-

ность потенциалов, а следовательно, и напряженность поля, поддерживать постоянными, то нужно добавочную площадь покрыть добавочными зарядами.

Если оставить неизменной площадь пластин и заряд их, то при сближении или раздвигании пластин напряженность поля изменяться не будет: между параллельными пластинами напряженность поля зависит только от их заряда.

Но при постоянстве напряженности поля разность потенциалов возрастает вместе с возрастанием расстояния между пластинами.

Если заряд q выражать в кулонах, а напряжение U в вольтах, то величина емкости окажется выраженной в фарадах (*ф*). Миллионную долю фарады называют микрофарадой (*мкф*).

Часто оказывается нужным применять еще меньшие единицы емкости: одну миллионную долю микрофарады называют пикофарадой (*пф*):

$$1\ \text{ф} = 10^6\ \text{мкф} = 10^{12}\ \text{пф}.$$

Емкость двух параллельных пластин, если изоляцией служит воздух, вычисляется по формуле

$$C = 8{,}85 \cdot 10^{-14} \frac{S}{d};$$

здесь S — площадь одной пластины, *см*^{2};
d — расстояние между пластинами, *см*.

При площади $S = 50$ *см*^{2} и расстоянии между пластинами $d = 0{,}1$ *см* емкость конденсатора оказывается равной $C = 44{,}2$ пикофарады, или $4{,}42\ 10^{-11}$ *ф*.

При напряжении 200 *в* заряд на таких пластинах окажется равным $\pm 8{,}85 \cdot 10^{-9}$ *к*.

Электрической емкостью обладают практически все элементы электрической цепи. Особенно большой емкостью обладают электрические кабели.

В электротехнике часто бывает нужно иметь между теми или иными точками цепи определенную емкость.

Для этого создают искусственные устройства, называемые конденсаторами. Простейший конденсатор сравнительно большой емкости можно устроить, увеличивая площадь пластин и уменьшая расстояние между ними.

С этой целью берут две тонкие металлические ленты *2* (фольга, станиоль), прокладывают между ними для изоля-

ции пропитанную парафином бумагу *1* и свертывают их в пакет (рис. 5-13а). Емкость таких конденсаторов (их называют бумажными) обычно не превосходит миллионных долей фарады.

В качестве изоляции между металлическими лентами прокладывают также тонкие слюдяные листочки.

Очень большими емкостями обладают так называемые электролитические конденсаторы; в них изоляцией между электролитом и наружной металлической оболочкой служит тончайший слой окиси алюминия. Небольшой по размерам электролитический конденсатор может быть изготовлен емкостью в десятки и сотни микрофарад.

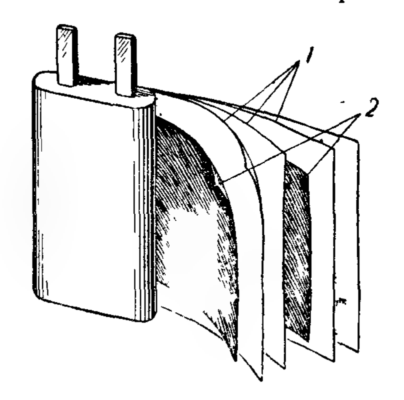


Рис. 5-13а. Бумажный конденсатор.

Особенностью электролитического конденсатора является его пригодность только для определенной полярности приложенного напряжения — металлическая оболочка должна быть соединена с отрицательным полюсом, а электрод, соприкасающийся с электролитом, должен быть соединен с положительным полюсом. В противном случае пленка окиси разлагается проходящим током и ее изолирующие свойства нарушаются.

В радиотехнике широкое применение имеют воздушные конденсаторы с выдвижными пластинами: поворачивая рукоятку, изменяют взаимное перекрытие одной и другой группы пластин, тем самым изменяют ту часть поверхности пластин, которую можно считать образующей конденсатор.

Количество и разнообразие типов современных конденсаторов чрезвычайно велико — от самых маленьких, запрессованных в пластмассу, до конденсаторов высотой около 2 *м* и пригодных для напряжений в 100 тыс. *в*.

На рис. 5-13б изображены конденсаторы с керамической изоляцией.

Диэлектрическая проницаемость (ε). Заполняя различными изолирующими материалами пространство между одними и теми же электродами, — скажем, между пласти-

нами плоского конденсатора, — легко убедиться в том, что емкость конденсатора может существенно изменяться.

Так, емкость возрастает в 7 раз, если между пластинами вместо воздуха поместить стекло.

Число, показывающее, во сколько раз увеличивается емкость при заполнении конденсатора данной изолирующей средой, называют диэлектрической проницаемостью этой среды. Диэлектрическую проницаемость принято обозначать греческой буквой ε (эпсилон).

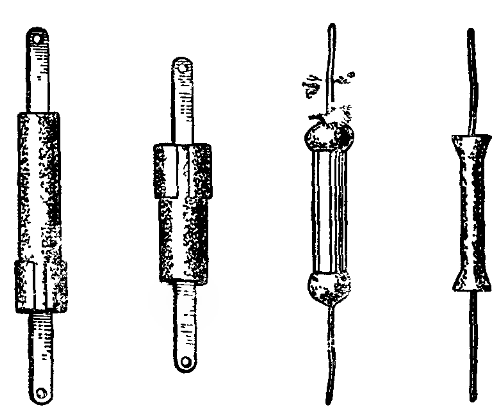


Рис. 5-13б. Различные типы электрических керамических конденсаторов.

Величина емкости сравнивается с емкостью тех же пластин при возможно тщательном удалении всякого вещества (вакуум, т. е. безвоздушное пространство). Однако опыт показывает, что заполнение пространства между пластинами воздухом практически не меняет емкости конденсатора. Это позволяет определить диэлектрическую проницаемость (ε) из сравнения емкости воздушного конденсатора с ем-

ТАБЛИЦА 5-1

Диэлектрическая проницаемость (ε) разных изолирующих материалов

Воздух	ε = 1
Пропитанная бумага . . .	4
Кварц	3,8
Трансформаторное масло	2,2
Фарфор	7,0
Янтарь	2,8
Слюда	7,0

костью конденсатора, заполненного изучаемой изоляцией. В табл. 5-1 даны значения ε для нескольких видов изоляции.

В недавнее время советскими учеными были найдены изолирующие вещества с проницаемостью в несколько тысяч.

Существуют плохие изоляторы (полупроводники) и с еще большей проницаемостью, достигающей сотен тысяч. Они не пригодны для изготовления конденсаторов, так как обладают заметной проводимостью.

5-8. КОНДЕНСАТОР В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

На рис. 5-12 показана цепь электрического генератора, содержащая конденсатор После включения цепи вольтметр, включенный в цепь, покажет полное напряжение генератора. Стрелка амперметра установится на нуле — ток через изоляцию конденсатора протекать не может.

Но проследим внимательно за стрелкой амперметра при включении незаряженного конденсатора. Если амперметр достаточно чувствителен [1], а емкость конденсатора велика, то нетрудно обнаружить колебание стрелки: сразу после включения стрелка сойдет с нуля, а затем быстро вернется в исходное положение.

Этот опыт показывает нам, что при включении конденсатора (при его зарядке) в цепи протекал ток — в ней происходило передвижение зарядов: электроны с пластины, присоединенной к положительному полюсу источника, перешли на пластину, присоединенную к отрицательному полюсу.

Как только конденсатор зарядится, движение зарядов прекращается.

Отключая генератор и повторно замыкая его на конденсатор, мы уже не обнаружим движения стрелки: конденсатор остается заряженным, и при повторном включении движения зарядов в цепи не происходит.

Для того чтобы вновь наблюдать отклонение стрелки, нужно замыкать генератор на разряженный конденсатор. С этой целью, предварительно отключив генератор, замкнем пластины конденсатора проволокой, при этом между зажимами конденсатора и подносимой к ним проволокой

---

[1] При проведении опыта с очень чувствительным амперметром нужно последовательно с ним включить на всякий случай сопротивление порядка сотни или сотен омов. Можно воспользоваться для этого электрической лампочкой 25—50 *вт*, 220—120 *в*.

проскочит искра, тем самым легко убедиться, что при разряде конденсатора в его цепи опять же протекал ток.

Если замыкание проволокой произвести так, чтобы путь зарядов проходил через амперметр, легко увидеть, что его стрелка кратковременно отклонится. Отклонение стрелки теперь должно происходить, конечно, в другую сторону.

После разряда конденсатора можно повторить первый опыт — стрелка амперметра вновь покажет, что в цепи конденсатора передвигаются электрические заряды (проходит ток).

Попытаемся вычислить величину тока, протекающего в проводах, присоединенных к конденсатору.

Если за промежуток времени Δt напряжение конденсатора увеличивается на Δu, то, значит, за это же время его заряд увеличился на

$$\Delta q = C \cdot \Delta u,$$

т. е. заряд конденсатора возрастает на произведение емкости и приращения напряжения.

Предположим, что напряжение на конденсаторе емкостью в 10 *мкф* $= 10^{-5}$ *ф* возросло на 50 *в* ($\Delta u = 50$ *в*) за время в одну десятую долю секунды ($\Delta t = 0{,}1$ *сек*). В таком случае за это же время заряд положительной пластины конденсатора увеличился на

$$\Delta q = 10^{-5}\ \text{ф} \cdot 50\ \text{в} = 5 \cdot 10^{-4}\ \text{к}.$$

Но для того чтобы такой заряд прошел по проводам за время $\Delta t = 0{,}1$ *сек*, нужно, чтобы по ним протекал средний ток

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{5 \cdot 10^{-4}\text{к}}{0{,}1\ \text{сек}} = 5 \cdot 10^{-3}\ \text{а} = 5\ \text{ма}.$$

Зарядка конденсатора через сопротивление. Представим себе, что генератор с постоянным напряжением $U_г = 100$ *в* замыкается через сопротивление $r = 10$ тыс. *ом* на незаряженный конденсатор емкостью $C = 100$ *мкф* (рис. 5-14).

В начальный момент, пока еще конденсатор незаряжен, его напряжение равно нулю. Значит, все напряжение источника ложится на сопротивление r. А это значит, что по закону Ома в цепи будет протекать ток

$$I_0 = \frac{U_г}{r} = \frac{100\ \text{в}}{10\,000\ \text{ом}} = 10\ \text{ма}.$$

С течением времени, напротив, конденсатор зарядится, его напряжение будет равно напряжению генератора, в сопротивлении не будет тока, на нем не будет никакого напряжения. При этом заряд конденсатора должен быть равен

$$q = C \cdot U_{г} = 100 \cdot 10^{-6}\ ф \cdot 100\ в = 10^{-2}\ к.$$

Поставим такой вопрос: как скоро заряд в одну сотую кулона может быть сообщен конденсатору?

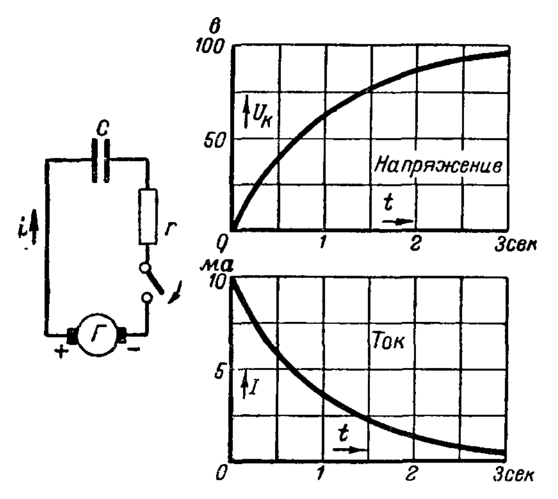


Рис. 5-14. Зарядка конденсатора C через сопротивление r.

Слева показана электрическая схема, на которой применено общепринятое изображение конденсатора. Справа показано, как с течением времени нарастает напряжение на конденсаторе $U_К$ и как постепенно убывает ток I. Эти графики построены в предположении, что конденсатор емкостью 100 *мкф* заряжается от источника постоянного напряжения 100 *в* через сопротивление 10 000 *ом*. В этом случае зарядка происходит очень медленно Если бы емкость составляла всего 1 *мкф*, а сопротивление 1 *ом*, все происходило бы в миллион раз скорее Для того чтобы приведенные графики оказались пригодными и для этого второго случая, нужно считать, что время выражено не в секундах, а в миллионных долях секунды (в общем случае при любых r и C указанные на графике значения времени следует умножить на произведение C и r). Если напряжение источника остается 100 *в* то значения тока дожны быть увеличены в 10 000 раз. Например, в начальный момент будет протекать ток не 10 *ма*, а 100 *а*. Длительность и характер процесса не зависят от напряжения источника.

Если бы в цепи ток не уменьшался, а оставался бы равным I_0, т. е. 10 *ма*, то для этого бы потребовалось время, равное всего лишь 1 *сек*,

$$\Delta t = \frac{q}{I_0} = \frac{10^{-2}\ к}{10^{-2}\ а} = 1\ сек\ \left(\text{если } I_0 = \frac{q}{\Delta t}, \text{ то } \Delta t = \frac{q}{I_0}\right).$$

Но сообразим, может ли долго протекать такой ток, как I_0? Если бы такой ток протекал четверть секунды, он уже сообщил бы конденсатору четверть полного заряда, а значит, поднял бы его напряжение до четверти от полных 100 *в*.

Но когда напряжение конденсатора возросло до 25 *в*, ток должен уменьшиться до 7,5 *ма*. В самом деле, напряжение генератора 100 и 25 *в* на конденсаторе, значит, только разность между ними приходится на сопротивление.

Опять же по закону Ома

$$i = \frac{100\ в - 25\ в}{10\,000\ ом} = 7{,}5\ ма.$$

Но такой ток будет заряжать конденсатор медленнее, чем его заряжал ток в 10 *ма*.

Из приведенного рассуждения ясно, что:

1) нарастание напряжения на конденсаторе будет происходить, постепенно замедляясь;

2) ток, достигая наибольшего значения $U_г/r$ в начальный момент, потом постепенно уменьшается;

3) чем больше емкость (больше заряд) и чем больше сопротивление цепи, тем медленнее происходит зарядка конденсатора.

На рис. 5-14 приведены кривые, показывающие, как происходит зарядка конденсатора.

Разряд конденсатора на сопротивление. Если отключить генератор и через сопротивление r замкнуть пластины конденсатора, начнется процесс его разряда. На рис. 5-15 приведены кривые тока и напряжения конденсатора при его разряде.

Энергия электрического поля в конденсаторе. Заряженный конденсатор обладает определенным запасом энергии, заключенной в его электрическом поле.

Об этом можно заключить по тому, что заряженный конденсатор, отключенный от сети, способен некоторое время поддерживать электрический ток, об этом можно судить и по искре, наблюдаемой при разряде конденсаторов.

Энергия, заключенная в конденсаторе, подводится к нему в то время, когда он заряжается от генератора. В самом деле, во время его зарядки в цепи течет ток и к его зажимам приложено напряжение, а это значит, что ему сообщается энергия Полное количество энергии, запасенное конденсатором, может быть выражено формулой

$$W = \frac{U^2 \cdot C}{2}.$$

Энергия равна половине квадрата напряжения, умноженного на емкость.

Если напряжение выражено в вольтах, а емкость в фарадах, то энергия окажется выраженной в джоулях или ваттсекундах.

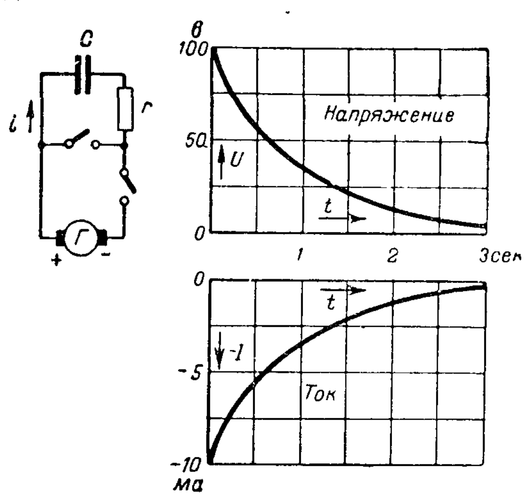


Рис. 5-15. Разряд конденсатора C через сопротивление r.

Слева показана электрическая схема После зарядки конденсатора отключается генератор, а пластины конденсатора замыкаются через сопротивление (верхний рубильник замыкается). Справа показано, как изменяются ток и напряжение конденсатора с течением времени. Графики построены для случая $U_г = 100$ *в*, $C = 100$ *мкф*, $r = 10\,000$ *ом*

Уменьшение емкости и сопротивления до значений 1 *мкф* и 1 *ом* увеличило бы скорость разрядки в миллион раз.

Начальное значение тока (при неизменности начального напряжения) при этом возросло бы в 10 000 раз и составляло бы 100 *а* вместо 10 *ма*. При других значениях r и C время, показанное на графике, нужно умножить на произведение Cr.

Так, энергия, запасенная в конденсаторе емкостью 100 *мкф* при напряжении 1 000 *в*, равна:

$$W = \frac{1\,000^2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{2} = 50 \text{ дж или вт·сек.}$$

Это, конечно, не очень большая энергия (такая энергия поглощается лампочкой 50 *вт* за каждую секунду). Но если конденсатор быстро разряжается (скажем, за одну тысячную долю секунды), то мощность происходящего разряда энергии, конечно, очень велика

$$P = \frac{W}{t} = \frac{50 \text{ вт·сек}}{0{,}001 \text{ сек}} = 50 \text{ квт.}$$

Поэтому понятно, что при разряде большого конденсатора звук искры похож на хороший выстрел.

Быстрым разрядом энергии, запасенной в конденсаторе, иногда пользуются для сварки маленьких металлических изделий.

При разряде конденсатора на сопротивление энергия, заключавшаяся в электрическом конденсаторе, переходит в тепло нагреваемого сопротивления.

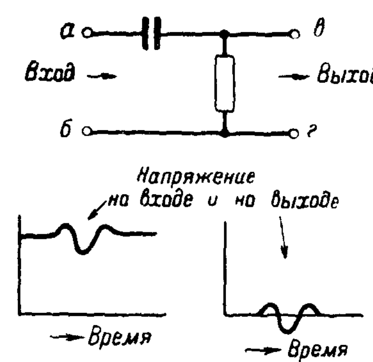


Рис. 5-16. На входе схемы между точками *а* и *б* приложено постоянное напряжение $U_0 = 200$ *в* и маленькое, изменяющееся во времени напряжение Δu—его форма соответствует передаваемому сигналу.

Конденсатор не пропускает постоянный ток (соответствующий U_0). Маленькое изменяющееся напряжение Δu меняет заряд конденсатора. Протекающий зарядный ток создает падение напряжения на большом сопротивлении. Это падение напряжения очень близко к значению переменного напряжения Δu. Таким образом, напряжение на выходе схемы между точками *в* и *г* приблизительно равно Δu

Применение конденсаторов. Применения конденсаторов в электротехнике очень разнообразны.

Рассмотрим здесь некоторые из них.

1. Конденсаторы широко применяются для целей изоляции двух цепей по постоянному напряжению при сохранении связи между ними на переменном токе. Конденсаторы изолируют постоянное напряжение, не пропуская постоянный ток. В то же время малейшее изменение напряжения изменяет их заряд и, следовательно, пропускает через них соответствующий переменный ток (рис. 5-16).

2. На свойствах конденсатора пропускать ток под действием изменяющегося напряжения и не пропускать ток под действием постоянного напряжения основано устройство сглаживающих устройств (фильтры, не пропускающие переменное напряжение). На рис. 5-17 показано такое устройство — переменный ток проходит через первое сопротивление и конденсатор, но благодаря большой емкости конденсатора колебание напряжения на нем очень мало. На выходе схемы напряжение сглажено—оно близко к постоянному.

Еще более сильное сглаживание можно получить, включая вместо сопротивления индуктивные катушки L. Как

было показано в гл. 3, при протекании изменяющегося тока в них наводится э. д. с. препятствующая колебаниям тока. Такое сглаживающее устройство показано на рис. 5-18.

3. На рис. 5-19 схематически показано устройство для зажигания горючей смеси в цилиндрах автомобильного двигателя.

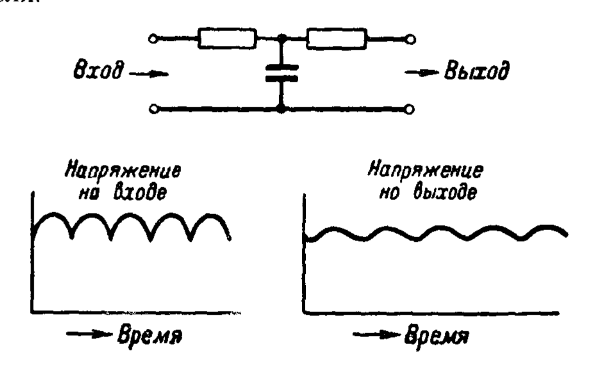


Рис. 5-17. Сглаживающее устройство, содержащее r и C (сопротивление и емкость).

Колебания напряжения на входе схемы не передаются на выход. Напряжение на выходе близко к постоянному.

Ток от батареи проходит через первичную обмотку катушки. В нужный момент он прерывается специальными подвижными контактами. Быстрое изменение тока наводит э. д. с. взаимоиндукции во вторичной обмотке катушки.

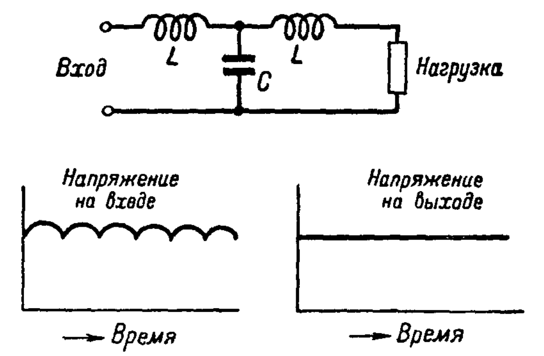


Рис. 5-18. Сглаживающее устройство, содержащее L и C (самоиндукцию и емкость).

На вход подано напряжение, заметно колеблющееся во времени. Напряжение на нагрузке почти постоянно.

Число витков вторичной обмотки очень велико и разрыв тока производится быстро. Поэтому э. д. с., наводимая во вторичной обмотке, может достигать 10—12 тыс. *в*. При таком напряжении происходит искровой разряд между электродами «свечи», воспламеняющий рабочую смесь в цилиндре. Прерывание контакта происходит очень часто;

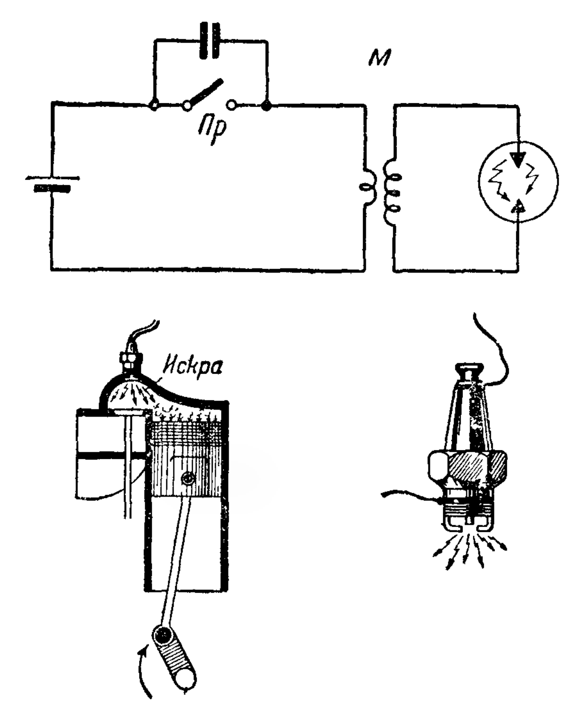


Рис. 5-19. Схема цепи, служащей для электрического зажигания горючей смеси в цилиндрах автомобильного двигателя.

Пр — прерыватель Внизу показан разрез цилиндра с поршнем, над которым смесь воздуха с бензином воспламеняется электрической искрой, проскакивающей между электродами свечи

так, в четырехцилиндровом двигателе один разрыв контактов происходит за каждый оборот двигателя.

На схеме рис. 5-19 показан конденсатор, присоединенный к зажимам прерывателя.

Объясним его назначение.

При отсутствии конденсатора разрыв цепи сопровождался бы образованием искры между контактами прерыва-

теля. Не говоря уже о том, что часто появляющаяся искра быстро привела бы к износу контактов, наличие искры препятствует резкому разрыву тока: ток, после того, как контакты разойдутся, еще остается замкнутым через искру и лишь постепенно спадает до нуля.

Если между контактами прерывателя включен конденсатор (как это показано на рис. 5-19), картина будет иной. Когда контакты начинают расходиться, цепь тока не разрывается — ток замыкается через еще незаряженный конденсатор. Но конденсатор быстро заряжается, и дальнейшее протекание тока оказывается невозможным.

Напряжение на заряженном конденсаторе может намного превысить 12 *в* (или 6), так как уменьшение тока в первичной обмотке катушки наводит в ней большую э. д. с. самоиндукции.

Несмотря на это, между контактами прерывателя искра уже не возникает, так как к этому моменту контакты прерывателя успевают достаточно далеко отойти один от другого.

Когда контакты прерывателя вновь замкнутся, конденсатор быстро разрядится и будет готов к работе при новом разрыве контактов.

Таким образом, конденсатор предохраняет контакты от обгорания и улучшает работу системы зажигания.

На схеме рис. 5-19 рядом с конденсатором может быть включено добавочное сопротивление. Его назначение станет ясным после того, как мы рассмотрим электрические колебания в системе индуктивность — конденсатор.

4. Одно из очень важных применений конденсаторы находят в цепях переменного тока (улучшение «косинуса фи»). Оно рассмотрено в гл. 7.

О применении конденсаторов в колебательных контурах ламповых генераторов рассказано в гл. 9.

Эти применения конденсаторов основаны на электрических колебаниях в системе LC (индуктивность и емкость).

Разряд конденсатора на индуктивность. Электрические колебания. Рассмотрим, что произойдет, если заряженный конденсатор замкнуть на катушку, обладающую индуктивностью и очень малым сопротивлением (рис. 5-20).

Возьмем конденсатор C, заряженный до напряжения U_0, — в его электрическом поле при этом запасена энергия

$$W_{э0} = \frac{U_0^2 C}{2}.$$

Замкнем конденсатор на индуктивную катушку. Очевидно, что конденсатор начнет разряжаться. Однако благодаря возникающей э. д. с. самоиндукции ток в катушке возрастает постепенно (гл. 3, § 3-16 и 3-18). Ток первоначально был равен нулю, постепенно он возрастает. По мере протекания тока разряжается конденсатор; его напряжение при этом уменьшается.

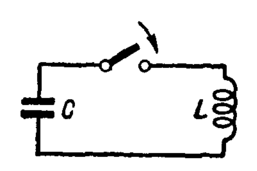


Рис. 5-20. Разряд конденсатора на индуктивность. В такой цепи возникают электрические колебания (рис. 5-21).

Но мы знаем, что скорость нарастания тока — или вообще скорость изменения тока — в индуктивности пропорциональна приложенному к ней напряжению (вернитесь, если нужно, к внимательному рассмотрению § 3-16).

По мере уменьшения напряжения на конденсаторе уменьшается скорость нарастания тока.

Мы сказали, что уменьшается скорость нарастания тока, но это вовсе не значит, что уменьшается сам ток. Действительно, рассмотрим графики напряжения на конденсаторе и тока, представленные на рис. 5-21.

Сначала ток был равен нулю, но возрастал он очень быстро (это видно по крутизне подъема кривой линии, изображающей зависимость тока от времени). В конце разряда конденсатора, когда его напряжение стало равным нулю, ток перестал нарастать — он достиг наибольшего значения и уже не возрастает дальше.

Мы можем все сказанное выразить таким уравнением

$$U_c = L\frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Напряжение на конденсаторе U_C, всегда равное напряжению на индуктивности, равно скорости нарастания тока $\Delta i/\Delta t$, умноженной на индуктивность L.

Конденсатор разрядился.

Энергия, заключавшаяся в электрическом поле конденсатора, покинула конденсатор. Но куда она перешла?

В случае разряда конденсатора на сопротивление энергия перешла в тепло нагретого сопротивления. Но в рассматриваемом сейчас примере сопротивление цепи ничтожно (мы пренебрегли им вовсе). Где же теперь энергия, заключавшаяся в конденсаторе?

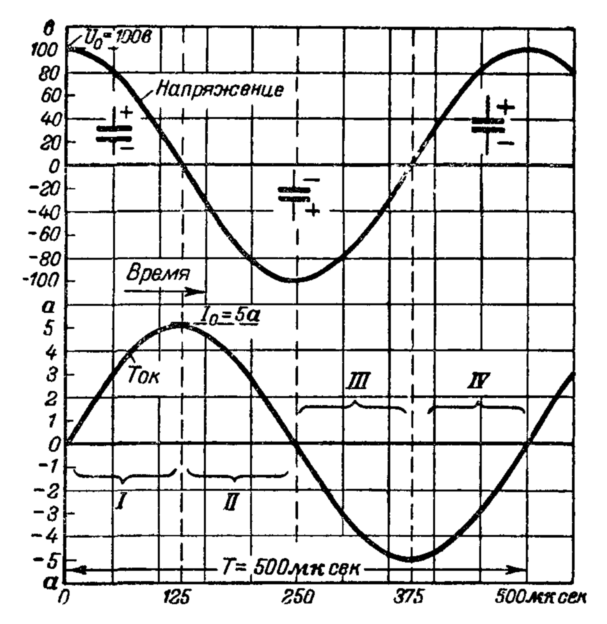


Рис. 5-21. Изменения напряжения на конденсаторе и разрядного тока в цепи, изображенной на рис. 5-20.

Приведенные здесь значения тока и напряжения соответствуют разряду конденсатора емкостью $C=4$ *мкф*, предварительно заряженного до напряжения $U_0=100$ *в*. Индуктивность катушки $L=1{,}6$ *мгн*. Этим данным соответствует период $T=500$ *мксек*.

Нужно опять обратиться в сведениям, сообщенным § 3-18, для того чтобы найти ответ.

Энергия перешла из электрического поля конденсатора в магнитное поле индуктивности.

В самом деле, в начале процесса тока в индуктивности не было, когда ток в индуктивности достиг величины I, в ее магнитном поле появилась энергия

$$W_м=\frac{I^2L}{2}.$$

На основании закона сохранения энергии нетрудно найти то наибольшее значение I_0, которое достигается током в момент равенства нулю напряжения на конденсаторе.

В этот момент в конденсаторе нет энергии, значит вся первоначально запасенная в нем энергия перешла в энер-

ю магнитного поля. Приравнивая их выражения, нахо-
ım:

$$W_{э0}=\frac{U_0^2C}{2}=\frac{I_0^2L}{2}.$$

Очевидно, что в любой момент времени, когда напряение на конденсаторе меньше, чем U_0, а ток меньше, эм I_0, общая энергия равна сумме энергий электрического и магнитного поля

$$\frac{U^2C}{2}+\frac{I^2L}{2}=W_{э0}.$$

Эта общая энергия равна первоначальному запасу энерии. Проверим сказанное на тех числовых значениях, оторые нетрудно найти из графика, приведенного на ис. 5-21.

Каждое деление по оси, на которой откладывается ремя, соответствует 50 *мксек* (микросекунд). Найдем из рафика значения тока и напряжения в момент времени 0 *мксек*. Они приблизительно равны:

$$U=80\ в\ и\ I=3\ a.$$

Іначит энергия электрического поля в этот момент составляет:

$$W_э=\frac{80^2\cdot 4\cdot 10^{-6}}{2}=1{,}28\cdot 10^{-2}\ дж.$$

Энергия магнитного поля в тот же момент равна:

$$W_м=\frac{3^2\cdot 1{,}6\cdot 10^{-3}}{2}=0{,}72\cdot 10^{-2}\ дж.$$

Общая энергия в этот момент времени (как и в любой другой) равна энергии, первоначально заключавшейся в конденсаторе:

$$W_{э0}=W_э+W_м=2{,}00\cdot 10^{-2}\ дж.$$

Итак, мы объяснили, что происходит за промежуток времени, понадобившийся для полного разряда конденсатора.

На рис. 5-21 этому соответствуют кривые тока и напряжения, относящиеся к промежутку, обозначенному цифрой *I* (время от 0 до 125 *мксек*).

Но дело на этом не кончается. В самом деле, хотя конденсатор разрядился полностью, но в цепи протекает большой ток. Этот ток не может сразу исчезнуть, так как его существование связано с энергией магнитного поля.

Этот ток продолжает протекать в цепи и перезаряжает конденсатор: он продолжает уносить электроны с отрицательных пластин и переносить их на пластины положительные. Точнее — с пластин, которые были отрицательными, на пластины, которые были положительными. Знак заряда на пластинах теперь изменяется.

На конденсаторе появляется напряжение, препятствующее дальнейшему протеканию тока, и ток постепенно начинает уменьшаться.

К концу промежутка времени, обозначенного цифрой *II* (к моменту времени 250 *мксек*), ток спадает до нуля. Но к этому моменту времени конденсатор опять окажется полностью заряженным; вся энергия, переходившая в магнитное поле, теперь вновь превратилась в энергию поля электрического.

Ток равен нулю. Конденсатор имеет такое же напряжение, как в начале (только другого знака). Все начинается снова, так, как было рассказано: конденсатор начинает разряжаться, ток начинает возрастать и т. д.

Разница только в знаке напряжения на конденсаторе и соответственно в направлении тока: ток остается отрицательным в течение промежутков времени, обозначенных цифрами *III* и *IV*.

В конце промежутка *IV* (т. е. после того как пройдет 500 *мксек*) все вернется буквально к исходному положению — конденсатор заряжен положительно и тока нет.

Начиная с этого момента, все повторяется сначала.

Рассмотренная картина и представляет собой электрические колебания в цепи LC.

Время, требующееся на то, чтобы после начала разряда все вернулось к исходному положению, называется периодом (T). При значениях емкости и индуктивности, для которых построены графики на рис. 5-21, один период составляет 500 *мксек*. Чем больше индуктивность и емкость, тем период колебаний больше.

Связь между этими тремя величинами выражается равенством

$$(T/2\pi)^2 = LC, \qquad \text{(A)}$$

позволяющим заранее подсчитать длительность периода.

Рассмотренные колебания называют *свободными* (в отличие от вынужденных или принудительных), так как они происходят при

отсутствии постороннего источника энергии, который мог бы заставить изменяться напряжение по какому-либо другому закону.

Такие колебания будут рассмотрены дальше в гл. 6 и 7. Там будет показано следующее. если источник (генератор) дает напряжение, изменяющееся по закону, подобному показанному на рис 5-21, и если к источнику подключена индуктивность L, то в индуктивности будет протекать ток

$$I_0 = \frac{U_0}{\omega L}, \tag{Б}$$

здесь I_0 и U_0 — наибольшие значения колеблющихся напряжения и тока;

ω — это величина, равная числу 2π, деленному на период колебания:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

($2\pi = 6{,}28$ — это число, выражающее отношение длины окружности к ее радиусу).

Сопоставим равенство (Б) с равенством наибольших значений энергии электрического и магнитного полей в колебательной системе

$$\frac{U_0^2 C}{2} = \frac{I_0^2 L}{2}. \tag{В}$$

Для этого подставим выражение для тока (Б) в равенство (В) и получим, что

$$\frac{U_0^2 C}{2} = \frac{U_0^2}{L^2\omega^2} \cdot \frac{L}{2}. \tag{Г}$$

1) Сокращая общие множители $\frac{1}{2}$ и U_0^2; 2) принимая во внимание, что $L/L^2 = 1/L$, и 3) решая получившееся равенство

$$C = \frac{1}{L\omega^2}$$

относительно ω, получаем:

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}.$$

Это равенство имеет тот же смысл, что равенство (А).

Небольшой проводимый здесь расчет показывает, до какой степени электротехнику нужно изучение математики и приобретение сноровки в проведении хотя бы простых алгебраических действий.

Мы рассмотрели колебания, происходящие при разряде конденсатора, пренебрегая сопротивлением цепи. На самом деле в любом колебательном контуре сопротивление нельзя считать равным нулю.

Наличие небольшого сопротивления приводит к постепенному затуханию колебаний, так как в сопротивлении происходит рассеяние энергии электромагнитного поля — она превращается в тепло в соответствии с законом Ленца — Джоуля. Поэтому каждый раз, когда вся энергия вновь сосредоточивается в электрическом поле конденсатора, напряжение на конденсаторе оказывается меньше.

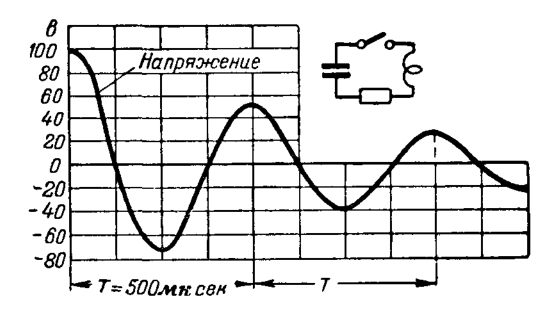


Рис. 5-22. Затухающий колебательный разряд.

Приведенный график напряжения на конденсаторе соответствует данным: $C = 4$ *мкф*, $L = 1{,}6$ *мгн*, $r = 4$ *ом*, начальное напряжение на конденсаторе $U_0 = 100$ *в*.

На рис. 5-22 показаны кривые тока и напряжения в цепи rLC (т. е. в цепи, содержащей, кроме индуктивности и емкости, также и сопротивление).

В цепи rLC вообще не возникает колебаний при достаточно большом сопротивлении.

Разряд конденсатора происходит, как говорят, апериодически. Такой разряд показан на рис. 5-23. Разряд может

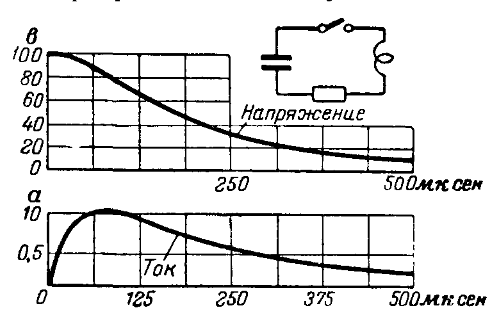


Рис. 5-23. Апериодический разряд конденсатора.

На графиках изображены напряжение и ток в цепи конденсатора при тех же индуктивности и емкости ($L = 1{,}6$ *мгн*, $C = 4$ *мкф*) и при сопротивлении, равном 64 *ом*.

быть сделан апериодическим и посредством подключения сопротивления параллельно к конденсатору.

Понятие о разнообразных применениях колебательной системы LC (колебательного контура) будет дано в гл. 7 и 9. Сейчас мы ограничимся указанием на то, что наличие конденсатора между контактами прерывателя в автомобиле (рис. 5-19) может служить источником колебаний, мешающих радиоприему. Эти колебания могут «гаситься», если ввести добавочное сопротивление (в соответствии со схемой рис. 5-23).

5-9. ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Между движущимся электрическим зарядом и магнитным полем возникает определенное взаимодействие. Оно заключается в том, что на заряд начинает действовать сила, изменяющая направление его движения.

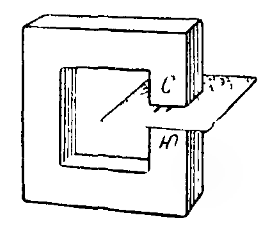


Рис. 5-24. Показано воображаемое расположение рис. 5-25 между полюсами магнита.

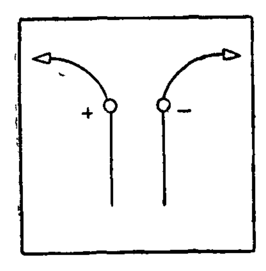


Рис. 5-25. Движение отрицательного (—) и положительного (+) зарядов в магнитном поле. Направление магнитного поля показано на рис. 5-24.

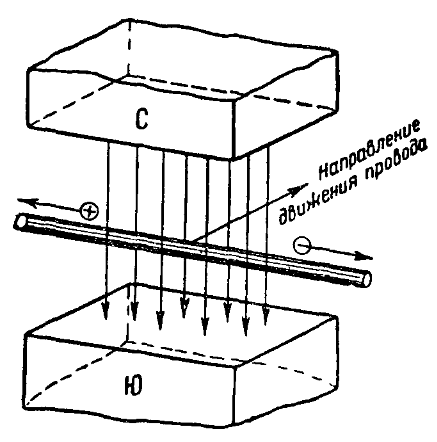


Рис. 5-26. Провод движется в магнитном поле. Отрицательные заряды стремятся двигаться вправо, положительные — влево. Сравни с рис. 5-25.

Представим себе, что лист этой книги внесен между полюсами магнита, как это показано на рис. 5-24. Тогда движение двух зарядов, отличающихся только

своим знаком, будет происходить так, как показано на рис. 5-25.

Двигаясь в магнитном поле, разноименные заряды стремятся перемещаться в противоположные стороны.

Этим объясняется разделение зарядов в проводе, движущемся в магнитном поле: положительные заряды стремятся двигаться к одному краю провода, отрицательные — к другому (рис. 5-26).

Разделение зарядов в магнитном поле — это как раз то, что происходит в электрических генераторах. В самом деле, на рис. 5-26 показан простейший генератор с одним проводом: если мы соединим гибкой проволокой концы провода, движущегося в магнитном поле, то через эту проволоку потечет ток (предполагается, что эта проволока сама не движется в магнитном поле). Заряды, разделяющиеся при движении в магнитном поле вновь соединяются через проволоку, замыкающую цепь. Таким путем может быть объяснено явление электромагнитной индукции (наведение э. д. с.).

Еще два замечания:

1. Когда по проводу течет ток, магнитное поле начинает тормозить движение провода: для преодоления этого торможения при движении провода нужно затрачивать энергию. Эта извне подведенная энергия и превращается в энергию, которую получает от генератора цепь тока.

2. Электрические заряды не создаются внутри генератора. В нем происходит только разделение зарядов, существующих в проводе (входящих в строение его вещества). Эти заряды никак не проявляют себя в обычном состоянии ввиду равного количества отрицательного и положительного электричества.

В целом ряде электронных и ионных приборов также применяется управление движением электронов и положительно заряженных частиц посредством воздействия на них магнитным полем.

5-10. ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Несмотря на трудности, встретившиеся на пути изучения законов, которым подчиняются мельчайшие частицы вещества (атомы, ионы, электроны и др.), в современной электротехнике получили широчайшее распространение приборы, основанные на управлении процессами ионизации, движением электронов и т. п.

Интересно привести слова, сказанные М. В. Ломоносовым больше полутораста лет тому назад:

«Первоначальные частицы исследовать столь же нужно, как самым частицам быть. И как без нечувствительных частиц тела не могут быть составлены, так и без оных испытаний учение глубочайшее физики невозможно».

Управляемые электронные лампы. Мы уже рассматривали простейшую двухэлектродную лампу (кенотрон или диод). Такая лампа была изображена на рис. 5-3.

Незначительное усложнение конструкции кенотрона позволяет управлять величиной протекающего через кенотрон тока.

Покидая раскаленную нить, электроны обладают весьма незначительными скоростями. Эта начальная скорость увеличивается по мере того, как электрон продвигается к положительному электроду (к аноду) подобно падающему камню, скорость которого увеличивается при его падении под действием силы тяжести. Роль земного притяжения в этом случае, конечно, играет электрическое поле, созданное внешним источником.

Но чем большее число электронов покинуло катод, тем в худших условиях оказываются следующие электроны. Между отдельными электронами существуют силы отталкивания. Электрон, находящийся впереди, отталкивает электрон, движущийся вслед за ним (вспомним, что одноименные заряды отталкиваются). Электроны тормозятся, собираясь вблизи катода и образуя так называемое «электронное облачко». Это облачко хотя и рассасывается под действием сил, притягивающих электроны к аноду, но одновременно и пополняется приходящими от накаленного катода электронами.

Поместив вблизи катода металлическую сетку, мы можем менять величину этого торможения. Схема рис. 5-27 показывает, как складываются условия работы в такой электронной лампе.

Напряжение вспомогательной батареи распределяется по сопротивлению, вдоль которого скользит ползушка. Чем ближе ползушка установлена к положительному зажиму батареи, тем больше будет напряжение на сетке, тем больше будет и та сила, которая действует на находящиеся вблизи катода электроны, а следовательно, тем больше будет ослабляться тормозящее действие облачка.

Отверстия в сетке достаточны для того, чтобы быстро

летящие электроны пролетали через них, не задерживаясь на самой сетке.

Если включить вспомогательную батарею отрицательным зажимом к сетке, а положительным к катоду, сетка будет иметь отрицательный заряд и будет препятствовать вылету электронов из катода. Такой сеткой можно запереть ток в анодной цепи.

Снабженная сеткой электронная лампа нашла многочисленное применение в электротехнике. Малейшие колебания напряжения на сетке резко сказываются на величи-

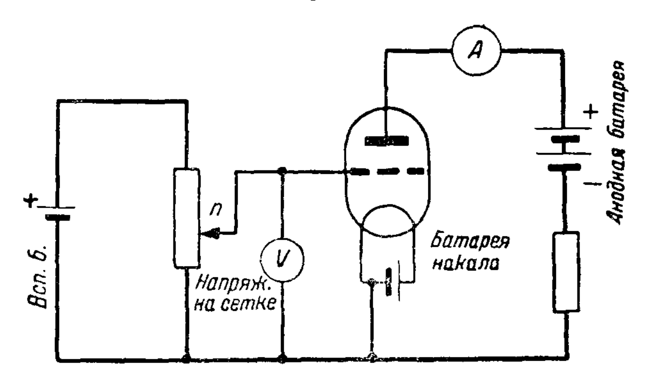


Рис. 5-27. Величина тока, протекающего через электронную лампу, регулируется сеткой.

Чем больше напряжение между сеткой и катодом, тем больше показания миллиамперметра, включенного в цепь трубки (в анодную цепь). Напряжение на сетке можно изменять, передвигая ползушку *n* вдоль сопротивления, через которое протекает ток от вспомогательной батареи (*Всп. б*)

не тока лампы. Это позволяет пользоваться лампой в качестве усилителя.

Заметим тут же, что возрастание электрического тока в электронной лампе ограничивается количеством электронов, испускаемых накаленным катодом. После того как ток достиг некоторого предельного значения, ни дальнейшее увеличение анодного напряжения, ни дальнейшее увеличение потенциала сетки не приводят к увеличению тока.

Устройство простейших усилителей будет описано в гл. 9.

Подробные сведения о них читатель может найти в специальных книгах.

Газоразрядные приборы. Кроме пустотных ламп, описанных выше, в электротехнике широкое применение имеют приборы, заполненные разреженными газами, например нео-

ном, аргоном или парами ртути. Такие приборы, называемые газотронами, имеют то преимущество, что могут пропускать через себя значительно больший ток при меньшем напряжении между анодом и катодом

Это объясняется тем, что отрицательный заряд электронов, движущихся от катода к аноду, уравновешивается положительными зарядами ионов. Хотя подвижность ионов невелика и электрический ток в ионизированном газе обусловлен главным образом движением электронов, однако указанное влияние положительного заряда очень велико Если ток в электронных лампах обычно не превышает десятков миллиампер, то в приборах с газовым разрядом ток может достигать сотен ампер.

В приборах газового разряда с горячим катодом и с холодным анодом ток может проходить только в одном направлении. Такие приборы обладают выпрямляющим действием

Газоразрядные приборы с сеточным управлением получили название тиратронов.

До тех пор, пока на сетке имеется достаточно низкий отрицательный потенциал, электроны, испускаемые катодом, возвращаются обратно под действием сил электрического поля Если потенциал сетки повысится, электроны, минуя сетку, попадают в область воздействия положительного анода. Ускоряясь под действием сил электрического поля на пути от катода к аноду, электроны приобретают столь большую скорость, что при столкновениях с нейтральными молекулами газа они ионизируют их. Процесс ионизации быстро охватывает все пространство лампы, заполненной газом. В приборах с ртутным катодом притягивающиеся к нему положительные ионы вызывают очень сильное испускание электронов из ртути.

Заметим, что в отличие от электронных ламп в тиратронах новое снижение потенциала сетки не может прекратить увеличившийся ток

Электронный осциллограф. Очень важный вид электронных трубок предназначен для зрительного наблюдения (или фотографирования) быстро изменяющихся электрических напряжений.

Рассмотрим устройство таких трубок, называемых электронными осциллографами (рис. 5-28)

Электроны, испускаемые накаленным катодом, разгоняются сильным электрическим полем и под влиянием поля образуют тонкий пучок летящих электронов — элек-

тронный луч. Собирание электронов в тонкий луч называется их фокусировкой

Электроны могут беспрепятственно пролетать внутри трубки, так как из нее тщательно откачан воздух

При отсутствии других отклоняющих сил электроны летели бы прямо по оси трубки и попадали на середину экрана, вызывая его свечение.

Свечение экрана происходит потому, что торцовая поверхность стеклянной трубки покрыта специальным соста-

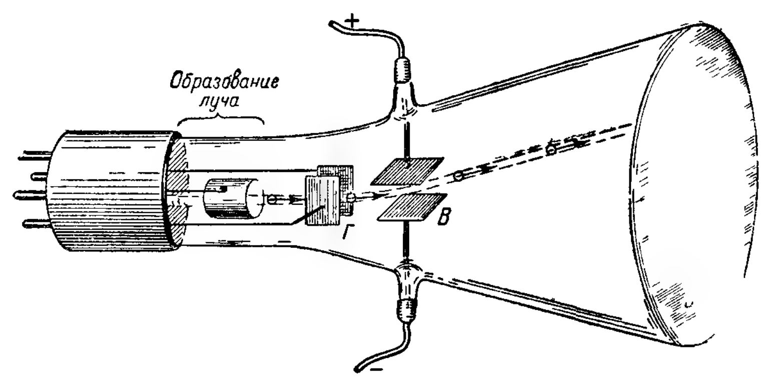


Рис 5-28 Схематическое изображение электронного осциллографа.

Г — пластины горизонтального отклонения, *В* — пластины вертикального отклонения, *Э* — экран, на котором виден светящийся след ударявшихся в него электронов Электроны с экрана возвращаются к положительному полюсу источника по стеклу, не являющемуся, конечно, хорошим проводником, но обладающим достаточной проводимостью для пропускания очень малого тока электронного луча

вом, атомы которого излучают свет при ударе быстро летящих электронов.

Но на пути электронного луча имеется две пары пластин

Первая из них (*Г*) отклоняет электроны в горизонтальном направлении, если между этой парой пластин создано электрическое поле.

Попадая в поле, электроны испытывают силу, отклоняющую их от первоначального пути (см. пример 2 в § 5-4).

Чем сильнее поле между пластинами, тем сильнее отклоняются электроны.

Если к пластинам горизонтального отклонения приложить напряжение, изменяющееся во времени по пилообразному закону (рис. 5-29), то электроны будут с рав-

номерной скоростью прочерчивать горизонтальную черту на экране.

Электронный луч смещается в горизонтальном направлении прямо пропорционально напряжению, а само напряжение прямо пропорционально времени (на каждом промежутке T). Значит и горизонтальное смещение луча при этом оказывается прямо пропорциональным времени.

Пройдя первую пару пластин, электронный луч попадает в поле действия второй пары пластин (B). Эти пластины смещают поток движущихся электронов в вертикальном направлении. Если верхняя пластина заряжена положительно, а нижняя отрицательно, то электронный луч отклонится кверху (одноименные заряды притягиваются, разноименные отталкиваются).

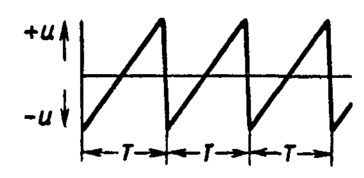


Рис. 5-29. Напряжение на пластинах горизонтального отклонения равномерно изменяется от $-U_0$ до $+U_0$. Затем напряжение быстро принимает отрицательное значение и вновь начинает равномерно изменяться.

По мере изменения напряжения на этой паре пластин будет изменяться и вертикальное отклонение луча.

Подавая то напряжение, которое хотят наблюдать, на вертикальные пластины, и заставляя луч смещаться в горизонтальном направлении пропорционально времени, получают на экране светящееся изображение — осциллограмму, — подобное графикам, показанным хотя бы на рис. 5-22 и 5-23.

Масса электронов ничтожно мала — они могут быстро изменять направление своего движения. Поэтому электронные осциллографы могут применяться для изучения очень быстро изменяющихся напряжений. Так, например, электронные осциллографы применяют для изучения быстрых электрических колебаний в радиотехнике. В СССР посредством особого осциллографа был записан (впервые в мире) ток молнии, ударившей в специальный молниеотвод.

В сочетании с электронными усилителями электронные осциллографы могут записывать очень слабые и очень быстро изменяющиеся напряжения.

Устройство телевизионных трубок похоже на устройство электронного осциллографа.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

6-1. ПОЛУЧЕНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Возможность преобразования различных видов энергии в электрическую. Для получения в замкнутой цепи электрического тока достаточно в нее включить аккумулятор или гальванические элементы. Нам уже известно, что в аккумуляторах и гальванических элементах химическая энергия превращается в электрическую.

В цепи можно получить электрический ток также при нагревании спая проводов из двух разных металлов (термопары). В этом случае тепловая энергия превращается в электрическую.

Известно еще много способов преобразования в электрическую энергию других видов энергии. Не меньшее число способов существует и для обратного преобразования электрической энергии в другие виды энергии.

Возможность преобразования электрической энергии в другие виды энергии. При протекании электрического тока по сопротивлению в нем выделяется тепловая энергия. В лампах накаливания, на экране электронного осциллографа происходит преобразование электрической энергии в световую.

В промышленности наиболее часто применяется преобразование механической энергии в электрическую и, наоборот, превращение электрической энергии в механическую.

Преобразование механической энергии в электрическую. На всех электростанциях получение электрической энергии производится следующим путем: энергия воды или пара вращает вал генератора, превращаясь в энергию механическую; вращение вала генератора приводит к преобразованию механической энергии в электрическую.

Одним из самых простейших устройств для преобразования механической энергии в электрическую является маленький генератор, так называемая «динамо — машина», устанавливаемый на велосипеде для питания электрической лампочки в фаре. Велосипедист, нажимая на педали велосипеда, приводит во вращение его колеса. Вращение колеса приводит во вращение вал «динамо-машины», и таким образом, механическая энергия превращается в электрическую.

Каждый, кто ездил на велосипеде, на котором установлена «динамо-машина», хорошо знает, что при включении фары ехать становится труднее, так как необходимо затрачивать больше энергии. Эта добавочная энергия превращается в электрическую энергию, которая расходуется лампочкой фары.

Преобразование электрической энергии в механическую. Можно также привести большое число примеров обратного преобразования электрической энергии в механическую.

Включая вентилятор, нажимая кнопку лифта, мы включаем электрические двигатели, в которых электрическая энергия превращается в механическую энергию.

Электрические двигатели, установленные в электропоездах, у станков на заводах и фабриках, также потребляют электрическую энергию и превращают ее в механическую, в энергию движения.

6-2. ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Читателю, конечно, известно, что на электростанциях вырабатывается для потребителей не постоянный, а переменный ток. Электрическая осветительная сеть в общежитиях и квартирах, в театрах и клубах, так же как и силовая электрическая сеть на заводах и фабриках, в большинстве случаев питается переменным током.

Широкое распространение переменного электрического тока не случайно. Переменный ток легко получить в генераторах за счет механической энергии. Его напряжение удобно повышать и понижать с помощью трансформаторов.

Наведенная электродвижущая сила. Для преобразования механической энергии в электрическую необходимо энергию движения преобразовать в энергию электрического тока.

Электрический ток при этом возбуждается путем электромагнитной индукции (гл. 3).

Явление электромагнитной индукции может получить техническое применение лишь в том случае, если мы сумеем непрерывно наводить напряжение в электрических цепях. Ясно, что схемы рис. 3-37 и 3-41 не удовлетворяли этому условию: в первом случае получался лишь кратковременный толчок напряжения; во втором случае наведенное напряжение опять-таки исчезало, лишь только проводник покидал пределы магнитного поля.

Спросим себя, может ли э. д. с., наведенная в каком-нибудь контуре, сохранять неизменными как свою величи-

ну, так и свое направление. Чтобы обеспечить постоянство э. д. с., надо или непрерывно увеличивать сцепленный с контуром магнитный поток, или, наоборот, все время уменьшать его. Если магнитный поток будет в равные промежутки времени получать одинаковые приращения, то э. д. с. будет неизменной по величине.

Ясно, что нельзя неограниченно увеличивать магнитную индукцию. Для нее существует предел, обусловленный и экономической целесообразностью, и сегодняшним уровнем техники. Этим пределом и определяется тот промежуток времени, в течение которого наведенная э. д. с., а следовательно, и электрический ток могут оставаться постоянными. Простой расчет позволяет нам оценить длительность этого промежутка.

Допустим, что мы располагаем возможностью получить магнитное поле с индукцией 25 000 *гс*. Возьмем прямоугольную рамку 40×50 *см*^{2}, т. е. с площадью 2 000 *см*^{2}. Наибольший магнитный поток, с которым мы в состоянии сцепить нашу рамку, равен половине вольт-секунды. Потребуем, чтобы по рамке проходил постоянный ток 1 *а*. Если сопротивление рамки равно 0,001 *ом*, то для этого нужна э. д. с., равная 0,001 *в*. Такая э. д. с. будет получена при равномерном изменении магнитного потока от нуля до 0,5 *в · сек* в течение 500 *сек*. Можно даже удвоить этот результат, меняя поток в рамке от —0,5 *в сек* до +0,5 *в · сек*, т. е. в общей сложности на одну вольт-секунду. Тогда ток 1 *а* можно поддерживать в течение 1 000 *сек*, так что через любое сечение проводника пройдет заряд 1 000 *к*. Нетрудно подсчитать, что поддерживать ток 10 *а* нам удастся лишь в течение 100 *сек*, что соответствует переносу такого же заряда 1 000 *к*.

Между тем от генераторов требуется непрерывная работа, исчисляемая не секундами и минутами, а месяцами и годами. При таких обстоятельствах индуктированное напряжение может быть лишь изменяющимся: магнитный поток сквозь площадь рамки должен попеременно увеличиваться и уменьшаться, и тогда его величина не превзойдет заданного предела.

Если сопротивление, к которому подключается источник изменяющегося по времени напряжения, не обладает свойством односторонней проводимости, как например, кенотрон (гл. 4), то протекающий по цепи ток будет также переменным.

6-3. РАМКА, ВРАЩАЮЩАЯСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

На рис. 6-1 показано простейшее устройство для получения переменного тока. По катушке проходит постоянный ток и, следовательно, магнитное поле также постоянно. Стальной сердечник придает магнитным линиям желательную форму: между полюсами получается приблизительно однородное поле. В этом поле равномерно вращается прямоугольная рамка. Концы рамки соединены при помощи скользящих контактов с вольтметром.

Как уже сказано, магнитный поток, созданный катушкой, является постоянным. Но та его доля, которая сцеп-

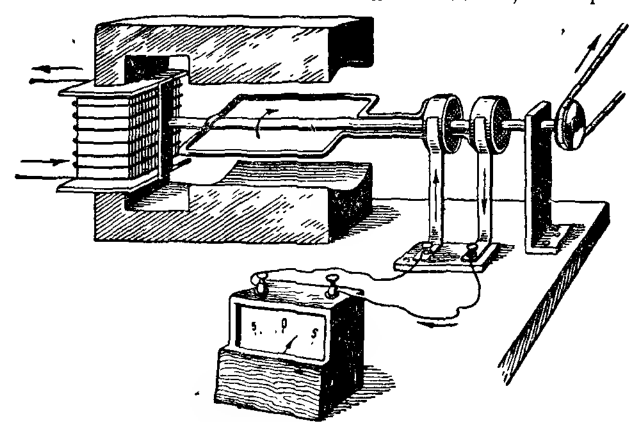


Рис. 6-1. Получение переменного тока. Стрелка вольтметра попеременно отклоняется вправо и влево от нулевого положения.

лена с вращающейся рамкой, будет неодинакова в различные моменты времени.

Изменение величины магнитного потока, пронизывающего виток, происходит непрерывно, хотя поток, создаваемый электромагнитом, остается неизменным. Следовательно, в рамке будет наводиться э. д. с. И действительно, опыт показывает, что стрелка вольтметра отклоняется.

Периодическое изменение наведенной э. д. с. Проследим шаг за шагом, как будет изменяться э. д. с. рамки при ее равномерном вращении. Очевидно, что достаточно проследить за изменением э. д. с. на протяжении одного полного оборота рамки. После того как сделан полный оборот, рамка возвращается в исходное положение, и происходящие в ней явления будут повторяться в той же последовательности. В рамке будет наводиться периодическая э. д. с.,

длительность периода которой равна времени одного полного оборота.

На первый взгляд может показаться, что период э. д. с. равен времени не полного оборота, а полуоборота. Ведь после того, как рамка сделает один полуоборот, она, казалось бы, займет прежнее положение в магнитном поле. Чтобы разобраться в этом, обратимся к рис. 6-2, где изображены последовательные положения рамки через восьмые части полного оборота.

Сличим положения *г* и *е*. В обоих положениях рамка сцеплена с одинаковыми по величине магнитными потоками. Но есть и существенное различие. В тот момент, когда рамка находится в положении *г*, магнитный поток увеличивается. В положении *д* поток достигает наибольшей возможной для него величины, равной произведению индукции поля *B* и площади рамки *S*. Если мы будем смотреть вдоль линий поля, то э. д. с. будет стремиться посылать ток в направлении, обратном ходу стрелки часов. В правом проводе ток направлен на нас (острие стрелки), в левом проводе ток направлен от нас (хвост стрелки).

Противоположная картина наблюдается в момент времени *е*. Сейчас магнитный поток уменьшается, а следовательно, глядя вдоль линий поля, мы увидим, что э. д. с. стремится посылать ток по ходу часовой стрелки. Направление тока по сравнению с моментом *г* изменилось на прямо противоположное. Отсюда, между прочим, следует, что в момент времени *д* и э. д. с. и ток равны нулю. Хотя величина магнитного потока в этом момент времени наибольшая, скорость его изменения равна нулю.

Теперь сличим положения *б* и *е*. Казалось бы, здесь налицо полное совпадение: рамка сцеплена с одинаковыми потоками. В обоих случаях поток сквозь рамку уменьшается. В левом проводе ток направлен на нас, в правом — от нас. Но дело в том, что между моментами времени *б* и *е* рамка сделала половину оборота, и левый провод превратился в правый. Таким образом, хотя величина тока в эти моменты времени одинакова, однако направления токов оказываются противоположными. Если считать ток в момент времени *б* положительным, то ток в момент времени *е* надо считать отрицательным.

Если в положениях *а* и *д* э. д. с. и ток оказываются равными нулю, то в момент времени *в* они должны достичь своих наибольших значений. Любопытно, что как раз в этот момент времени сцепленный с рамкой магнитный

а ю с
б
в
г
д
е
ж
з
и ю с
Напряжение меняет направление
Отрицательные значения напряжения
Положительные значения напряжения
Отсчет напряжения
Отсчет времени
Половина периода
Период (соответствует полному обороту рамки)

Рис. 6-2. Изменения напряжения на концах вращающегося витка.

поток равен нулю. Но скорость его изменения в этот момент оказывается наибольшей, так как провода рамки движутся поперек магнитных линий.

С подобными явлениями мы встречаемся очень часто в повседневной практике. Так, например, раскачиваясь на качелях, легко заметить, что когда качели отклоняются от своего нижнего положения, скорость их движения постепенно убывает. Наибольшее отклонение всегда бывает в тот момент, когда скорость уменьшается до нуля. Затем скорость движения качелей меняет свое направление на обратное. Скорость постепенно увеличивается и достигает наибольшей величины, когда качели проходят свое исходное положение, т. е. тогда, когда отклонение от исходного положения равно нулю.

Аналогично колеблется маятник стенных часов.

Во всех этих случаях происходит периодическое изменение величин, характеризующих данный процесс. Величина отклонения качелей или маятника от положения равновесия и скорость их движения являются периодическими величинами.

Кривая изменения э. д. с. во времени. В равномерно вращающейся рамке в однородном магнитном поле наводится по закону электромагнитной индукции периодическая э. д. с., т. е. получается переменное напряжение.

В том случае, когда вращающаяся рамка присоединена к замкнутой электрической цепи,

переменная э. д. с. создает в цепи переменный ток.

Кривая изменения э. д. с. за период показана в нижней части рис. 6-2. Дважды в течение периода э. д. с. делается равной нулю, дважды достигает своих наибольших (амплитудных) значений. Этим двум амплитудам соответствуют различные направления тока.

6-4. ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменный ток впервые применил П. Н. Яблочков в 1876 г. По его проекту были построены генераторы переменного тока.

Принцип устройства первых генераторов по существу ничем не отличался от устройства только что рассмотренного витка. Генератор показан на рис. 6-3. На круглый стальной цилиндр, называемый р о т о р о м, наматывается

обмотка, состоящая из нескольких последовательно соединенных витков. Один из витков показан на чертеже. Ротор соединен при помощи какого-нибудь привода, например ременной передачи, с двигателем.

Двигатель вращает ротор между полюсами электромагнита. Обмотки электромагнита питаются током от какого-нибудь независимого источника напряжения, например аккумуляторной батареи.

Концы роторной обмотки присоединены к вращающимся кольцам, укрепленным на валу ротора. На неподвижной

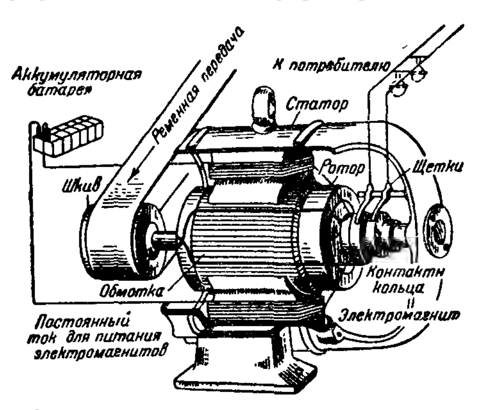


Рис. 6-3. Устройство генератора переменного тока.

части генератора — статоре — укреплены контактные щетки, скользящие вдоль вращающихся колец и подключенные к линии передачи, соединяющей генератор с потребителями электроэнергии, например с лампами накаливания.

В современных генераторах обмотка обычно располагается на статоре; магнит при этом укрепляется на валу ротора. Очевидно, что при этом принцип действия генератора остается неизменным.

Обратимся к уже рассмотренному примеру вращения рамки в магнитном поле. Электродвижущая сила наводилась в рамке при ее вращении в поле за счет изменения сцепленного с рамкой магнитного потока. Точно такое же изменение сцепленного с рамкой магнитного потока можно получить в неподвижной рамке, если вращать электромагнит вокруг рамки. Так как в современных генераторах обмотка не вращается, то и нет надобности в скользящих

контактах для присоединения нагрузки. Это значительно упрощает их эксплуатацию. Если же магнитное поле создается не постоянным магнитом, а электромагнитом, скользящие контакты все же остаются, но по ним протекает ток электромагнита, который обычно значительно меньше, чем ток в обмотке, и работа контактов облегчается.

Период переменного тока. В гл. 12 рассматриваются подробно устройство и работа современных генераторов переменного тока. Заметим только, что большинство современных генераторов делает 3 000 оборотов в минуту (сокращенно *об/мин*). В минуте 60 *сек*. Следовательно, генератор совершает 50 *об/сек*.

Продолжительность одного оборота или периода составляет[1]:

$$\frac{1}{50} = 0{,}02 \textit{ сек.}$$

В некоторых генераторах переменного тока, устанавливаемых, например, на самолетах и кораблях, продолжительность периода короче. Эти генераторы вращаются со скоростью 400, 500 и 800 *об/сек*.

Соответственно продолжительность одного периода составляет:

$$\frac{1}{400} = 0{,}0025 \textit{ сек};$$

$$\frac{1}{500} = 0{,}002 \textit{ сек};$$

$$\frac{1}{800} = 0{,}00125 \textit{ сек.}$$

Частота переменного тока. Обычно каждый тип генератора рассчитан только на одну определенную скорость вращения. Для того чтобы узнать период переменного тока, получаемого от генератора, необходимо посмотреть технический паспорт генератора. На щитке, прикрепляемом к каждому генератору, также имеются для этого необходимые данные. Однако в паспорте и табличке на щитке указан не период, а частота переменного тока.

Частотой переменного тока называют число периодов изменения тока за одну секунду.

---

[1] Продолжительность одного оборота ротора не всегда равна продолжительности одного периода переменного тока. Об этом см. гл. 12 «Машины переменного тока».

Частота переменного тока обыкновенно обозначается буквой f, период — буквой T. Следовательно,

$$f = \frac{1}{T}.$$

Для единицы частоты принято наименование *гц* (читается: герц).

Пример. Определить частоту переменного тока, период которого составляет одну тысячную секунды (0,001 *сек*).

Очевидно, что частота

$$f = \frac{1}{0{,}001} = 1000 \text{ гц}.$$

Для сокращения записи, подобно тому как 1 000 *м* обозначается 1 *км*, 1 000 *в* = 1 *кв*, применяется аналогичная запись:

$$1\,000 \text{ гц} = 1 \text{ кгц}.$$

Применяются и более крупные единицы частоты:

$$1\,000\,000 \text{ гц} = 1\,000 \text{ кгц} = 1 \text{ Мгц}.$$

Обозначение *Мгц* читается: мегагерц (мега — значит миллион).

Низкая, высокая и промышленная частоты. Позже мы познакомимся с генераторами, которые могут давать переменный ток с частотой в несколько сотен мегагерц. Однако они устроены совершенно иначе, чем рассмотренный выше. В них с помощью электронных ламп производится преобразование постоянного тока или тока *низкой* частоты в переменный ток *высокой* частоты.

Для генераторов, работающих на электростанциях, в СССР установлена стандартом частота 50 *гц*. Такова же частота тока и в обычной осветительной сети, а также в сетях заводов и фабрик. Поэтому частоту 50 *гц* называют обычно *промышленной* частотой.

6-5. СИНУСОИДА

Чтобы получить исчерпывающее представление о повторяющемся каждый период или, как говорят, периодическом явлении, достаточно изучить его в промежутке времени, равном одному периоду. Так, например, зная, как изменяется продолжительность дня в течение какого-нибудь

одного года, можно указать, чему равна продолжительность любого дня в любом году. Этой цели служат раз навсегда составленные таблицы, приводимые в календарях.

Подобные таблицы можно составить для периодических токов и э. д. с. Период разбивается на несколько частей, например на 24. Замеряется значение тока в начале периода, затем в момент времени, наступающий, например, через $^1/_{24}$ часть периода. Следующее измерение производится снова с промежутком времени $^1/_{24}$ часть периода и т. д.

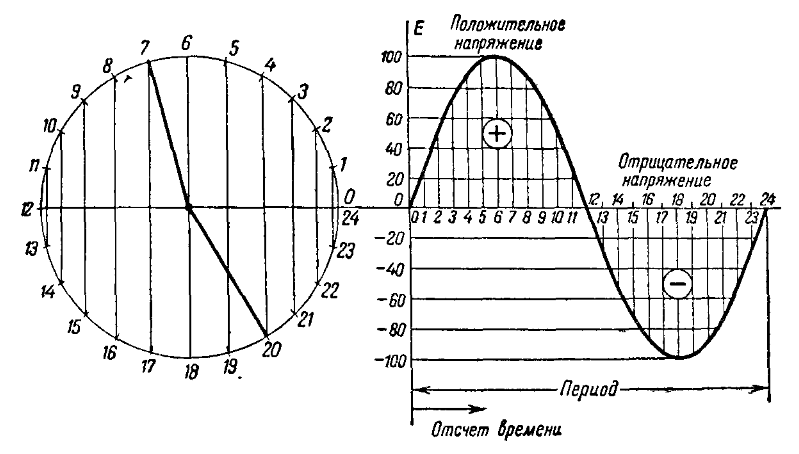


Рис. 6-4. Построение синусоиды. Окружность делится на 24 части. Длины отвесов (перпендикуляров) изображают мгновенные значения стандартной э. д. с., отсчитываемые через равные промежутки времени.

Наша задача облегчается тем обстоятельством, что действующий в СССР государственный стандарт предписывает заводам изготовлять генераторы с вполне определенным изменением э. д. с. в течение периода. Изображающая эту э. д. с. кривая может быть найдена простым построением.

Построение кривой э. д. с. Построим окружность, радиус которой в каком-то масштабе изображает амплитуду нашей э. д. с. Так, например, если амплитуда э. д. с. равна 100 *в*, а радиус окружности равен 2 *см*, то 1 *мм* диаграммы соответствует 5 *в*.

Окружность разделим на какое-нибудь число равных частей (окружность на рис. 6-4 поделена на 24 части), наносим отметки и нумеруем их, двигаясь против хода стрел-

ки часов. Нумерацию начинаем от нуля, и тогда последний номер равен числу частей, на которое разделена окружность.

Проведем диаметр через начальную (нулевую) отметку. Если окружность разделена на четное число частей, то этот диаметр пройдет также через отметку с номером, равным половине числа делений.

На этот диаметр опускаем отвесы (перпендикуляры) из каждой отметки. Исключение составят отметки, лежащие на диаметре. Мы скажем, что длина принадлежащих им отвесов равна нулю.

Длины отвесов изображают мгновенные значения стандартной э. д. с., отсчитываемые через равномерные промежутки времени. Если отвес расположен над диаметром, то величина э. д. с. будет положительной. Отвесы, находящиеся под диаметром, соответствуют отрицательным значениям э. д. с. Длины отвесов указаны в таблице. Знак для отметок, находящихся в левом столбце, — положительный, а в правом — отрицательный.

Номер отметки	Значение э. д. с. или тока	Номер отметки
0	0	24
1	25,9	23
2	50,0	22
3	70,7	21
4	86,6	20
5	96,6	19
6	100	18
7	96,6	17
8	86,6	16
9	70,7	15
10	50,0	14
11	25,9	13
12	0	12

Выполним еще одно построение. Построим прямолинейный отрезок, длиной которого будем изображать продолжительность периода. Разделим этот отрезок на такое же число равных частей, на которое мы делили окружность. В нашем примере каждому из делений будет соответствовать $^1/_{24}$ часть периода. К этой прямой пристраиваем отвесы, беря их длину из таблицы или перенося их с диаграммы рис. 6-4. При этом соблюдаем такое правило: положительные отвесы откладываем вверх, отрицательные — вниз.

Свободные концы отвесов соединяем плавной линией (рис. 6-4). Полученная кривая называется синусоидой. Она играет исключительно важную роль в электротехнических расчетах.

Синусоида изображает последовательные значения, принимаемые стандартной э. д. с. По тому же закону изменяются и токи в цепях, где действует синусоидальная э. д. с.

6-6. НАЧАЛЬНАЯ ФАЗА СИНУСОИДЫ

Две синусоиды с разными начальными фазами. Двое получили от нас одинаковое задание: построить кривую синусоидальной э. д. с., амплитуда которой равна 200 *в*, а период 0,02 *сек.* Казалось бы, мы вправе ожидать, что будут построены две вполне одинаковые кривые. Но нам приносят кривые, показанные на рис. 6-5. Надо решить, принять ли работу или забраковать ее.

Бросается в глаза, что кривые построены в разных масштабах. Чтобы построить синусоиду, надо выбрать два масштаба: один для изображаемой величины, в нашем примере — для э. д. с., и другой для времени. В вертикальном направлении отсчитывается величина э. д. с., и должно быть указано, какое количество вольт соответствует 1 *мм* диаграммы. В горизонтальном направлении отсчитывается время, и 1 *мм* диаграммы соответствует вполне определенное количество секунд. Выбор масштаба произволен, и основным соображением, определяющим этот выбор, является наглядность чертежа.

Вооружившись мерительной линейкой, мы убеждаемся в том, что оба чертежа выполнены в точном соответствии с таблицей. Обе кривые соответствуют тому определению синусоиды, которое было нами дано. Но одна синусоида начата от нулевого значения и в начале возрастает, а другая синусоида начата от значения, равного половине отрицательной амплитуды, и в начале убывает. Какое же из двух построений правильно?

Синусоида является периодической кривой и, следовательно, не имеет ни начала, ни конца. На наших чертежах мы обычно строим один из периодов синусоиды. После того как такое построение выполнено, уже нетрудно продолжить кривую как угодно далеко и вправо и влево. Что считать началом периода, совершенно безразлично. Вопрос решается соглашением, которое заключается от случая к случаю.

Подытоживая наши рассуждения, мы можем сделать заключение, что обе кривые на рис. 6-5 построены в точном соответствии с заданием.

Синусоида характеризуется тремя величинами. Чтобы полностью описать периодическое явление, протекающее

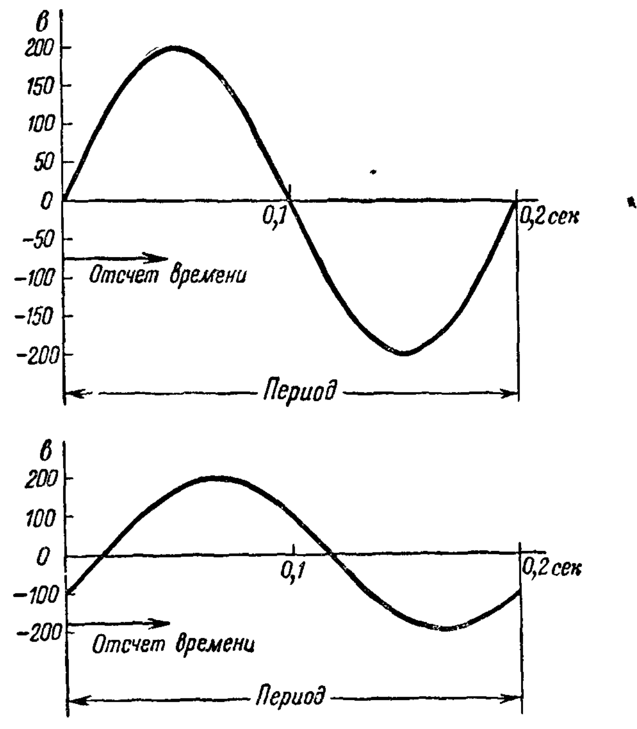


Рис. 6-5. Две синусоиды с разными начальными фазами и в разных масштабах. Верхняя синусоида начинается с нулевого значения и затем возрастает. Нижняя синусоида начата от значения, равного половине отрицательной синусоиды, и в начале убывает.

по синусоидальному закону, мы должны указать амплитуду, период и то значение синусоиды, которое мы хотим считать ее началом. На последнем признаке синусоиды надо остановиться подробнее.

Допустим, мы хотим считать началом периода тот момент, когда синусоида принимает значение, равное одной трети своей амплитуды. Такое определение было бы недостаточным — указанное значение наступает четырежды на

протяжении одного периода. Удобнее пользоваться понятием начальной фазы. Для этого надо вернуться к рис. 6-4.

Соединим какую-нибудь из отметок, сделанных нами на окружности, с ее центром. На рис. 6-4 такое построение выполнено для отметок № 7 и 20. Радиус, принадлежащий отметке 0, назовем начальным. Полуокружности соответствует угол 180 градусов. Так как полуокружность разделена на 12 частей, то при переходе от отметки к отметке угол изменяется на 15°. Поэтому мы припишем отметке № 7 угол, равный $7 \times 15° = 105°$. Отметке № 20 можно приписать угол $20 \times 15° = 300°$, и это будет совершенно правильно. Однако удобнее не вводить в расчет углов, бо́льших 180°. Мы припишем отметке № 20 отрицательный угол, равный $4 \times 15° = 60°$. Полезно запомнить, что углы, отсчитываемые в направлении хода часовой стрелки, считаются отрицательными.

Итак, для исчерпывающего определения синусоиды достаточно указать ее амплитуду, период и начальную фазу. Рекомендуем читателю самостоятельно построить две-три синусоиды с разными начальными фазами.

Необходимость определения начальной фазы. Необходимость определения начальной фазы легко вытекает из следующего простого примера.

Представьте себе два последовательно включенных генератора, частоты и амплитуды э. д. с. которых одинаковы. Спрашивается: можно ли заранее определить, какое суммарное напряжение будет в каждый момент времени?

Очевидно, что нельзя.

Согласное включение двух генераторов. Если генераторы имеют одинаковую начальную фазу, то кривые напряжения (синусоиды в данном случае) для каждого генератора, изображенные на одном и том же чертеже и в одинаковом масштабе, совпадут.

Следовательно, общее (суммарное) напряжение обоих генераторов будет всегда вдвое больше напряжения каждого генератора в отдельности.

Обычно такое включение генераторов называют согласным.

Встречное включение двух генераторов. Предположим, что один генератор имеет начальную фазу, равную нулю, а другой — равную 180°, т. е. величина напряжения первого генератора в любой момент времени имеет то же значение,

что и величина напряжения второго генератора, однако знаки напряжений (+ или —) не будут совпадать.

В моменты времени, когда напряжение первого генератора положительно, напряжение второго генератора отрицательно, и наоборот.

Учитывая, что напряжения складываются алгебраически, приходим к выводу, что результирующее напряжение в каждый момент времени равно нулю.

Заметим, что если фазы генераторов отличаются на 180°, то иногда говорят, что генераторы работают в противофазе или соединены встречно.

Читателю предлагается самому построить результирующую кривую напряжения генераторов, имеющих одинаковые частоту и амплитуду, а начальные фазы которых равны соответственно:

в одном случае	0 и 90°
в другом случае	90 и 270°
в третьем случае	90 и 180°

Сдвиг фазы. Очевидно, что две синусоиды, имеющие разные начальные фазы, как бы сдвинуты одна относительно другой по горизонтали. Поэтому разность начальных фаз двух синусоид и называют обычно сдвигом фазы.

Сложение двух синусоид дает опять синусоиду. Непосредственным построением суммарных кривых для любых двух синусоид, в том числе и с разными амплитудами, можно убедиться, что полученная кривая имеет опять-таки форму синусоиды, у которой может оказаться измененной начальная фаза или амплитуда, или то и другое вместе.

Таким образом,

сумма двух синусоид также является синусоидой.

6-7. ЗАКОНЫ ОМА И ЛЕНЦА — ДЖОУЛЯ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Закон Ома. Опыт показывает, что закон Ома (§ 2-8) сохраняет свою силу и для переменного тока. Поэтому, если по сопротивлению протекает переменный ток, на его концах будет переменное напряжение, пропорциональное току. В частности, в те моменты времени, когда ток становится равным нулю, нулю равно и напряжение на проводнике. Кривые рис. 6-6 показывают, что синусоиды тока и

напряжения имеют одинаковую начальную фазу. В этом случае говорят, что ток и напряжение совпадают по фазе. На нашем чертеже начальная фаза принята равной нулю.

Мощность в цепи переменного тока. Определение мощности, данное в § 2-6, полностью сохраняет свою силу и для цепей переменного тока: мощность равна произведению тока и напряжения. Мощность переменного тока также будет переменной величиной. Однако закон изменения

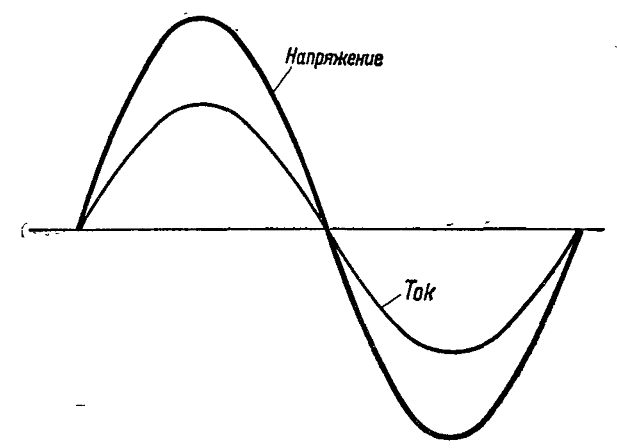


Рис. 6-6. Сдвиг фаз между током и напряжением на сопротивлении отсутствует. Напряжение и ток всегда имеют одинаковое направление.

мощности будет иным, чем закон изменения тока и напряжения.

И ток и напряжение изменяют свое направление дважды в течение периода. Из рис. 6-6 следует, что знаки тока и напряжения всегда одинаковы. Припомним правило алгебры: результатом перемножения двух чисел, имеющих одинаковые знаки, т. е. + и + или — и —, будет положительное число. Следовательно, мощность в нашей цепи будет всегда положительна. Это означает, что нагрев проводника происходит независимо от того, в каком направлении протекает по нему ток.

Построим кривую мощности, получая каждую ее точку путем перемножения соответствующих значений напряжения и тока (рис. 6-7). Попробуем подсчитать ту энергию, которая затрачивается за период на нагревание проводника.

Если бы мощность была постоянной, подсчет не вызвал бы затруднений. Энергия равнялась бы произведению постоянной мощности и того промежутка времени, за который подсчитывается работа. Но как решить ту же задачу, если мощность изменяется?

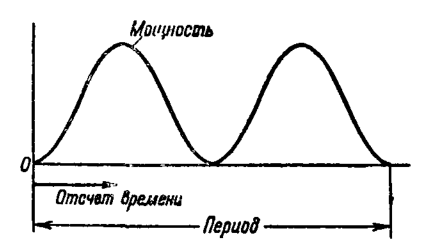


Рис. 6-7. Кривая мощности переменного тока, протекающего по сопротивлению.

Средняя мощность за период. Здесь удобно воспользоваться средним значением мощности за период. Чтобы найти среднюю мощность, делят период на равное число частей, например на 12, нумеруют отметки, начиная от нуля, подсчитывают мощность для моментов, соответствующих всем отметкам, кроме нулевой, результаты складывают и сумму делят на число отметок. Мы приведем здесь лишь результат этого подсчета. Он гласит:

средняя мощность равна половине своего наибольшего значения.

Это верно при условии, что ток и напряжение совпадают по фазе.

Таким образом, работа переменного тока за период равна произведению средней мощности и продолжительности периода.

Наибольшая мощность равна произведению амплитудных значений тока и напряжения. Следовательно, средняя мощность:

$$P=\frac{1}{2}I_м U_м,$$

где $I_м$ и $U_м$ означают амплитуды тока и напряжения. Закон Ома для того момента времени, когда ток и напряжение принимают свои амплитудные значения, записывается в виде:

$$U_м=rI_м.$$

Объединяя обе формулы, находим:

$$P=\frac{1}{2}rI^2_м,$$

что очень напоминает формулу $P=rI^2$, которую мы получили в § 2-12, изучая мощность в цепи постоянного тока.

Действующие значения тока и напряжения. Очевидно, что при одинаковых сопротивлениях и одинаковой мощности амплитуда переменного тока должна быть больше значения соответствующего постоянного тока. Сравнивая выражения для средней мощности при переменном токе и мощности постоянного тока, приходим к выводу, что

$$I_м^2 = 2I^2.$$

т. е. квадрат амплитуды переменного тока должен быть вдвое больше квадрата постоянного, что может быть записано и так:

$$I = \frac{I_м}{\sqrt{2}} = 0{,}707 I_м.$$

Следовательно, если бы в сопротивлении протекал постоянный ток, составляющий 0,707 от амплитуды переменного тока, мощность была бы такой, как при протекании переменного тока. Этот ток принято называть *действующим значением переменного тока.*

Подобно этому величина

$$U = 0{,}707 U_м$$

называется действующим значением переменного напряжения.

6-8. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Мы знаем, что в течение одного полупериода ток нарастает от нулевого значения до своего максимума и снова спадает до нуля. Половина периода промышленной частоты длится одну сотую долю секунды, и если бы стрелка амперметра поспевала за изменениями тока, то рассмотреть ее показания не удалось бы: быстро движущаяся стрелка создавала бы в нашем глазу впечатление сплошного пятна, так же как при быстром вращении велосипедного колеса нельзя рассмотреть спицы.

Но скорость изменения переменного тока настолько велика, что даже самая легкая стрелка даже при самом

малом трении не в состоянии поспеть за его изменениями. Спрашивается, что же будет показывать амперметр, включенный в цепь переменного тока?

Тепловой амперметр. Вспомним, как устроен тепловой амперметр (§ 2-14). Отклонение стрелки происходит благодаря разогреву металлической нити проходящим по ней током. Очевидно, что и переменный ток, проходя по нити, будет разогревать ее. В те моменты времени, когда значение переменного тока оказывается равным нулю, выделение тепла в нити прекращается. Но нить остывает не сразу, а по истечении времени, которое ей необходимо для того, чтобы остыть и уменьшить свою длину, переменный ток уже не будет равен нулю и снова будет разогревать нить [1]. Нагревание нити совершенно не зависит от того, в каком направлении по ней проходит ток. Следовательно, стрелка амперметра будет отклоняться все время в одну сторону.

Но каким же будет показание амперметра? Ответ подсказывается конструкцией прибора. Он покажет величину такого постоянного тока, который нагревал бы нить прибора точно так же, как и измеряемый переменный ток. Иными словами,

амперметр покажет действующее значение переменного тока. Также и тепловой вольтметр покажет действующее значение переменного напряжения.

Приборы электромагнитной и электродинамической систем. Сказанное остается справедливым также для приборов электромагнитный и электродинамической систем. Мы уже упоминали о том, что железо всегда притягивается к электромагниту независимо от того, как расположены его полюсы. Следовательно, независимо от направления тока в обмотке железный листок электромагнитного прибора будет втягиваться в катушку.

То же самое происходит и с приборами электродинамической системы. Направление тока изменяется одновременно в обеих катушках, и, следовательно, направление силы взаимодействия между катушками остается неизменным.

---

[1] Попутно отметим, что этими же причинами объясняется ровный свет электрической лампы; за такой короткий промежуток времени нить лампы не успевает остыть.

Как

электромагнитные, так и электродинамические приборы показывают действующие значения напряжений и токов.

Приборы магнитоэлектрической системы для измерения переменных токов непригодны, так как направление силы, действующей на их обмотку, зависит от направления протекающего по ней тока. Очевидно, что стрелка прибора не будет поспевать за изменениями тока.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

7-1. ИНДУКТИВНОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Самоиндукция. Цепь переменного тока имеет ряд характерных особенностей. Мы знаем (§ 3-2), что протекание тока связано с возникновением магнитного потока и что магнитные линии этого потока всегда пронизывают цепь создавшего их тока. Направление магнитных линий зависит от направления тока в цепи. Следовательно, в цепи переменного тока направление магнитных линий меняется каждые полпериода. Перемена направления тока неизбежно связана с переходом его через нулевое значение. Схематически это показано на рис. 7-1.

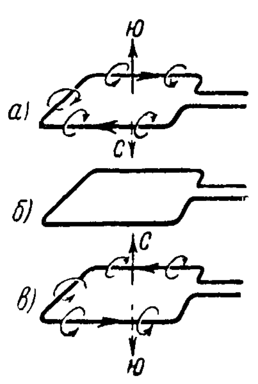


Рис. 7-1. Магнитные свойства переменного тока.

а — ток направлен по часовой стрелке, северный полюс обращен книзу; книзу направлены и магнитные линии, пронизывающие контур; *б* — ток равен нулю; виток не обладает магнитными свойствами; *в* — ток переменил свое направление, северный и южный полюсы поменялись местами; направление магнитных линий также изменилось.

Это явление во многом напоминает вращение витка между полюсами электромагнита (рис. 6-1). Там в результате вращения витка менялось число тех линий поля электромагнита, которые пронизывали виток. Здесь число магнитных линий изменяется в связи с тем, что меняется величина тока цепи. Результат в обоих случаях одинаков: в цепи наводится э. д. с. Последнее явление носит название самоиндукции.

Электродвижущая сила самоиндукции. Итак, в цепи действуют, во-пер-

вых, напряжение источник тока (генератора), и во-вторых, напряжение, возникшее в результате явления самоиндукции; его иногда называют электродвижущей силой (э. д. с.) самоиндукции. Наконец, протекание в цепи тока — все равно постоянного или переменного — создает в сопротивлении цепи падение напряжения, величина которого определяется законом Ома.

Получается та же картина, как если бы в цепи постоянного тока существовали два источника напряжения, две э. д. с. Но в этом случае необходимо выяснить, как направлено действие этих источников, т. е. складываются ли эти две э. д. с., увеличивая тем самым ток в цепи, или же, наоборот, они действуют навстречу друг другу.

Оказывается, что на протяжении одного периода переменного тока имеют место оба явления. В продолжение части периода напряжение генератора и напряжение самоиндукции направлены одинаково, т. е. их величины складываются. Временами же направление напряжения генератора оказывается противоположным направлению напряжения самоиндукции, и их величины уже вычитаются одна из другой.

Дело в том, что

> *напряжение самоиндукции всегда направлено таким образом, что оно препятствует изменению тока, стремясь поддержать его величину на одном и том же уровне.*

Положение вещей здесь примерно такое же, как и при вращении махового колеса. До тех пор, пока мы раскручиваем маховик и стремимся увеличить его скорость, маховик действует как тормоз: он препятствует увеличению скорости. Если же мы захотим остановить маховик и начнем уменьшать его скорость, маховик начнет действовать как двигатель и будет сопротивляться нашим попыткам остановить его.

Чем больше масса маховика, тем труднее изменить величину его скорости. Чем больше напряжение самоиндукции, тем труднее изменить величину тока. Отсюда следует, что самоиндукция представляет собой как бы сопротивление протеканию переменного тока.

Реактивное сопротивление. При постоянном токе число магнитных линий постоянно, и напряжения самоиндукции не возникает. Таким образом, индуктивная цепь оказывает переменному току большее сопротивление, чем постоянному.

Поскольку э. д. с. самоиндукции зависит от скорости изменения пронизывающего виток потока (§ 3-15), то значение возросшего сопротивления должно зависеть от длительности периода переменного тока. Чем короче период, чем больше частота переменного тока, тем больше скорость изменения магнитного потока. Следовательно, чем больше частота тока в витке, тем больше величина напряжения самоиндукции, тем большее сопротивление оказывается цепью переменному току.

Если в цепи действовало одно лишь напряжение самоиндукции, то сопротивление такой цепи оказалось бы по закону Ома равным

$$\frac{\textit{напряжение самоиндукции}}{\textit{ток}} =$$

$$= \textit{индуктивное (или реактивное) сопротивление.}$$

Реактивное сопротивление в формулах обозначается буквой x (икс).

Если бы в цепи полностью отсутствовало напряжение самоиндукции, например если бы цепь питалась от источника постоянного напряжения, то по закону Ома

$$\frac{\textit{падение напряжения в сопротивлении цепи}}{\textit{ток}} =$$

$$= \textit{сопротивление цепи постоянному току.}$$

Активное сопротивление. Сопротивление цепи постоянному току иногда называют активным (или омическим) сопротивлением.

Полное сопротивление. Но цепь переменного тока часто ведет себя таким образом, как будто в ней, кроме омического сопротивления, находится еще и индуктивное сопротивление. Однако то правило, которым мы пользовались для сложения сопротивлений в неразветвленной

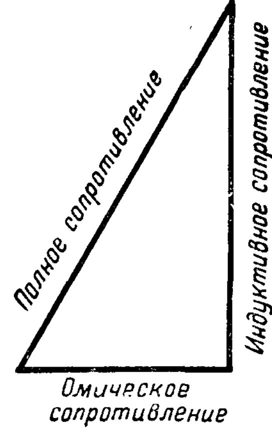


Рис. 7-2. Полное сопротивление цепи переменного тока равно гипотенузе прямоугольного треугольника. Стороны треугольника равны соответственно индуктивному и омическому сопротивлениям.

цепи постоянного тока (§ 2-7), здесь уже не годится. Расчет показывает, что для получения величины полного сопротивления цепи переменного тока надо построить прямоугольный треугольник, сторонами которого служили бы величины омического и индуктивного сопротивлений. Полное сопротивление изобразится тогда гипотенузой такого треугольника (рис. 7-2). Если, например, омическое сопротивление цепи равно 3 *ом*, а индуктивное 4 *ом*, то полное сопротивление будет равно 5 *ом*.

Полное сопротивление равно отношению величин переменного напряжения источника и тока в цепи. Полное сопротивление обозначается буквой z (зет).

Понятно, что здесь дело идет не о мгновенных, а о действующих значениях тока и напряжения.

7-2. ФАЗОВЫЙ СДВИГ В ИНДУКТИВНОЙ ЦЕПИ

Синусоиды тока и напряжения сдвинуты по фазе. При наличии самоиндукции не только увеличивается сопротивление цепи, но нарушается и одновременность хода изменения напряжения и тока. Синусоида тока оказывается сдвинутой по фазе относительно синусоиды напряжения.

Сдвиг фаз между переменными напряжением и током означает, что они проходят через свои нулевые и максимальные значения не одновременно. Длительность же периодов напряжения и тока при этом не изменяется и остается одинаковой.

Например, в момент, когда внешнее напряжение равно нулю, в цепи будет проходить ток, величина и направление которого определяются напряжением самоиндукции. Наоборот, в тот момент, когда ток в цепи проходит через нулевое значение, напряжение источника не равно нулю. Отсутствие тока объясняется тем, что в этот момент напряжение источника равно по величине и противоположно по направлению напряжению самоиндукции. Иными словами, напряжение самоиндукции в этот момент полностью уравновешивает напряжение источника. Процесс этот уясняется из рассмотрения рис. 7-3.

Мы видим, что напряжение самоиндукции усложняет явление. Когда ток, пройдя через нулевое значение, начинает увеличиваться, напряжение самоиндукции оказывается направленным прямо противоположно току, стремясь помешать его возрастанию. Наоборот, при спадании тока (после перехода через максимальное значение) напряже-

ние самоиндукции направлено одинаково с током, тем самым препятствуя его уменьшению.

Нетрудно убедиться, что когда величина тока равна нулю (моменты времени *б* и *г*), напряжение источника полностью уравновешивается напряжением самоиндукции. Наоборот, когда напряжение источника равно нулю (моменты времени *а* и *в*), величина тока поддерживается напряжением самоиндукции.

Положительная и отрицательная мощности

Следствием сдвига фаз между током и напряжением у потребителя является невозможность использовать ту энергию, которая доставляется ему генератором.

Чтобы убедиться в этом, перерисуем еще раз рис. 7-3, опустив для наглядности чертежа кривую напряжения самоиндукции. Получится рис. 7-4. Рассмотрение его показывает, что направление тока в цепи может или совпадать с напряжением источника (сплошная штриховка), или быть ему прямо противоположным (пунктирная штриховка).

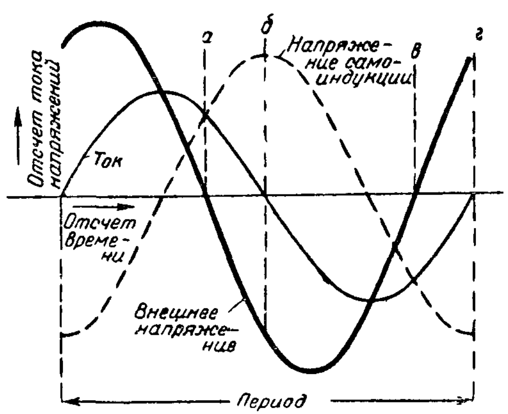


Рис. 7-3. Между током и приложенным напряжением существует сдвиг фаз. Несмотря на то, что в момент времени *а* внешнее напряжение равно нулю, по цепи все же проходит ток; направление тока совпадает с направлением напряжения самоиндукции. В момент времени *б* приложенное напряжение равно по величине и противоположно по направлению напряжению самоиндукции, сумма обоих напряжений дает нуль, поэтому ток также равен нулю.

Мощность электрической цепи равна произведению значений тока и напряжения:

$$P = U \cdot I$$

(§ 2-6). Следовательно, при сдвиге фаз мощность может принимать как положительные, так и отрицательные значения [1]. Но что такое отрицательная мощность?

Ответом на этот вопрос является схема рис. 7-5. Аккумуляторная батарея в зависимости от положения переклю-

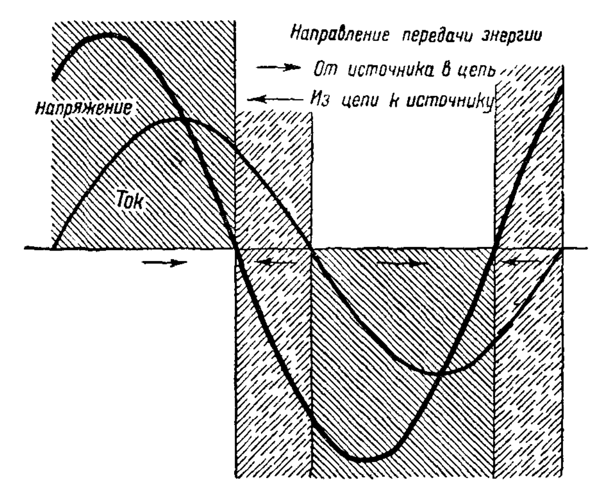


Рис. 7-4. Благодаря сдвигу фаз напряжение и ток могут быть направлены в противоположные стороны. В это время цепь возвращает часть энергии источнику. В результате уменьшается потребляемая мощность.

чателя будет присоединена или к генератору постоянного напряжения, или к какой-нибудь нагрузке. Напряжение батареи (ее э. д. с.) всегда направлено от ее положительного полюса во внешнюю цепь; это направление показано стрелкой *1*. Переведем переключатель в нижнее положение, т. е. присоединим батарею к нагрузке. Через нагрузку пройдет ток, направление которого обозначено стрелкой *2*. Батарея будет расходовать энергию, необходимую для

---

[1] Еще раз напомним следующее правило алгебры: результатом перемножения двух чисел, имеющих одинаковые знаки, т. е. + и + или — и —, будет положительное число. Наоборот, результатом перемножения двух чисел, имеющих разные знаки, будет отрицательное число.

поддержания тока в цепи. В этом случае направление тока совпадет с направлением напряжения батареи.

Теперь переведем переключатель в верхнее положение, присоединив батарею к генератору постоянного тока. Напряжение генератора направлено по стрелке 3, т. е. навстречу напряжению батареи. Если напряжение генератора больше э. д. с. батареи, то ток будет идти от генератора к батарее. Генератор будет заряжать батарею, сообщая ей запас энергии. Направление зарядного тока (стрелка 3) будет противоположно напряжению батареи.

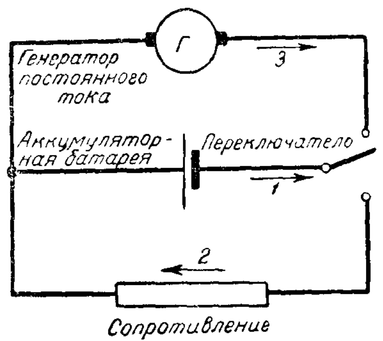


Рис. 7-5. Когда ток и напряжение батареи совпадают по направлению, она разряжается, расходуя свою энергию. Если направление напряжения батареи противоположно току, она заряжается, получая энергию от генератора.

Итак, если ток и напряжение имеют одинаковые направления, то источник — в нашем примере аккумуляторная батарея — расходует свою энергию. Наоборот, при противоположных направлениях тока и напряжения источник получает энергию из цепи. Положительный знак мощности соответствует передаче энергии от источника в цепь, а отрицательный знак мощности — передаче энергии из цепи к источнику.

Сдвиг фаз и мощность. Вернемся теперь к рис. 7-4. Оказывается, что при наличии фазового сдвига между напряжением и током энергия, посылаемая генератором, может быть потреблена в цепи лишь частично, так как только в течение части периода энергия передается к источнику. Кроме того, энергия генератора расходуется не только на тепло в активном сопротивлении; часть отдаваемой генератором энергии запасается в магнитном поле цепи. Уменьшение тока в цепи означает и уменьшение запаса энергии в ее магнитном поле. Освобождающаяся при этом энергия возвращается обратно источнику.

Получается любопытная картина: индуктивный потребитель, т. е. потребитель, в цепи которого существует напряжение самоиндукции, не может полностью израсходовать получаемую от генератора энергию —

сдвиг фаз уменьшает полезную мощность.

Посмотрим, как сложатся условия работы в цепи, где напряжение самоиндукции отсутствует (рис. 6-6). При этом будем считать, что условия работы генератора остались теми же, что и на рис. 7-4: генератор имеет прежнее напряжение и посылает в цепь прежний ток. Попутно отметим, что при отсутствии самоиндукции отношение между током и напряжением в любой момент времени остается постоянным, а именно:

$$\frac{U}{I}=r.$$

Но цепь уже не возвращает энергию генератору. Напряжение и ток в любой момент времени имеют одинаковые направления. Знак мощности всегда положителен (рис. 6-7). Потребляемая в цепи мощность увеличилась, так как прекратился возврат энергии генератору.

7-3. РАБОТА ГЕНЕРАТОРА НА ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

Увеличим еще больше тот сдвиг фаз, который существовал на рис. 7-5. Это достигается уменьшением омического сопротивления в цепи переменного тока. Например, омическое сопротивление катушки из толстых проводов может оказаться в несколько десятков раз меньше величины индуктивного сопротивления. Влияние омического сопротивления делается незаметным.

Происходящие здесь явления уясняются из рассмотрения рис. 7-6. Сдвиг фаз между током и напряжением до-

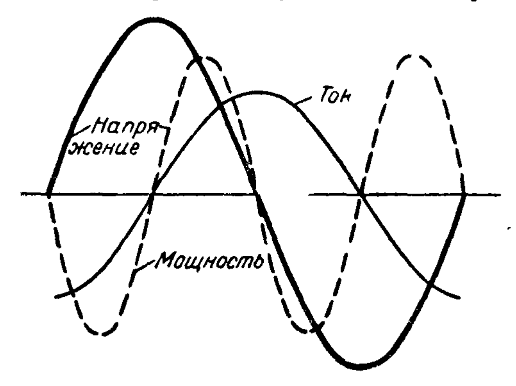


Рис. 7-6. Сдвиг фаз между напряжением и током равен $^1/_4$ периода. Средняя мощность за полпериода равна нулю.

стиг четверти периода. Это значит, что моменты прохождения тока и напряжения через свои нулевые и максимальные значения разделены промежутком времени в четверть периода.

Нанесем на чертеж также кривую изменения мощности генератора. Мощность в любой момент времени равна произведению тока и напряжения. Эта кривая показывает, что мощность, отдаваемая генератором в цепь, в точности равна мощности, отдаваемой в следующую четверть периода цепью в генератор. Генератор не совершает никакой полезной работы, а перебрасывает энергию в цепь, с тем чтобы вслед за тем получить ее обратно. Средняя мощность генератора оказывается равной нулю.

К тому же выводу мы придем, воспользовавшись законом Ленца — Джоуля (§ 2-12). Так как активное сопротивление цепи равно нулю, то нулю равна и потребляемая мощность.

Нагревание обмотки. В действительности средняя мощность генератора не точно равна нулю. Соединительные провода между генератором и нагрузкой, а также обмотка самого генератора обладают каким-то сопротивлением, хотя и очень малым.

При протекании тока в обмотке генератора и в соединительных проводах последние греются, на что и расходуется некоторая мощность.

Двигатель, вращающий вал генератора, будет затрачивать мощность на нагревание проводов и обмотки, а также на преодоление силы трения в подшипниках генератора.

Как ни мала энергия, расходуемая на нагрев обмотки генератора, с ней все же приходится считаться. Соединительные провода имеют хорошее естественное охлаждение (в 1 *м* длины провода рассеиваетсся небольшая мощность).

Обмотка генератора выполняется из длинного провода и имеет много витков, расположенных близко друг от друга. Даже если в каждом из них выделяется мало тепла, то при большом количестве витков общее количество выделяющегося тепла может быть очень большим. В этом случае и принудительная вентиляция генератора может оказаться не в состоянии отвести сконцентрированное в обмотке тепло.

Предельное значение тока генератора. Для любого генератора существует предельное значение тока, который может быть пропущен через его обмотки. Если этот предел будет превзойден, обмотки генератора перегреются.

Создается удивительное положение вещей. Генератор может не вырабатывать никакой мощности и тем не менее быть перегруженным.

Ясно, что

сдвиг фаз — крайне нежелательное явление.

Катушка индуктивности. Явление самоиндукции нами было рассмотрено на примере одновитковой рамки. Очевидно, что чем больше витков в рамке, тем больше будет магнитный поток, сцепленный с рамкой. Опыт подтверждает это заключение.

Практически почти всегда индуктивная нагрузка представляет собой многовитковую рамку или, как говорят, катушку индуктивности.

Такими катушками являются обмотки электродвигателей и трансформаторов, о которых речь будет идти позже (гл. 10, 11 и 12).

7-4. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ

Итак, величина потребляемой мощности зависит от величины сдвига фаз между напряжением и током. Следовательно, приведенная на стр. 248 формула мощности недостаточна для подсчета средней мощности переменного тока. Мощность в цепи переменного тока будет меньше, чем в цепи постоянного тока. Только при отсутствии сдвига фаз мы получим одинаковые значения мощности в обеих цепях.

Следовательно, формула мощности нуждается в поправочном множителе и притом меньшем единицы. Этот поправочный множитель учитывает величину фазового сдвига. Он называется коэффициентом мощности и сокращенно обозначается $\cos\varphi$ (читай: косинус фи).

Если при отсутствии сдвига фаз формула для мощности имела вид:

$$P = U \cdot I,$$

то при наличии сдвига фаз между током и напряжением формула примет такой вид:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi,$$

где по-прежнему I и U — действующие значения тока и напряжения.

Как определить коэффициент мощности. Вспомним, что для мощности переменного тока мы имели еще одну формулу, а именно: $P=I^2 \cdot r$ (стр. 239). Эта формула сохраняет свою силу и при сдвиге фаз. Если $U \cdot I \cdot \cos\varphi = I^2 \cdot r$, то после сокращения общего множителя I мы получим равенство $U \cdot \cos\varphi = I \cdot r$, которому можно придать такую форму:

$$\frac{r}{\left(\frac{U}{I}\right)} = \frac{r}{z} = \cos\varphi.$$

В левой части этого равенства дробь, числитель которой представляет собой омическое сопротивление цепи, а знаменатель — полное. Отношение этих сопротивлений равно коэффициенту мощности.

Этот поправочный множитель может быть получен и из треугольника сопротивлений, поскольку он равен отношению величин омического и полного сопротивлений. Ясно, что этот множитель всегда меньше единицы, так как катет меньше гипотенузы (рис. 7-2).

В лампах накаливания почти нет сдвига фаз между током и напряжением. Контур, образуемый нитью лампы, имеет незначительную площадь, а следовательно, пронизывается ничтожно малым магнитным потоком. Коэффициент мощности достигает своего наибольшего значения, т. е. равен единице.

Величина коэффициента мощности в трансформаторах и двигателях зависит от степени их загрузки. У двигателя, нагрузка которого совпадает с его номинальной (т. е. записанной на его щитке) мощностью, коэффициент мощности обычно равен 0,8—0,9, а у крупных двигателей даже выше. Если же двигатель загружен лишь частично, коэффициент мощности резко снижается.

Пример. В качестве примера определим величину рабочего тока двигателя, на щитке которого написано „4 *квт*, 220 *в*, $\cos\varphi = 0,8$".

Если бы коэффициент мощности равнялся единице, то рабочий ток двигателя был бы равен

$$\textit{ток} = \frac{\textit{мощность}}{\textit{напряжение}} = \frac{4\,000\ \textit{вт}}{220\ \textit{в}} = 18,2\ \textit{а}.$$

В действительности коэффициент мощности равен 0,8, а следовательно, заданная мощность может быть получена лишь при повышенном значении тока. Поэтому

$$I = \frac{18,2}{0,8} = 22,7\ \textit{а}.$$

Этот ток можно пропустить через обмотку двигателя, не перегревая ее. Если бы удалось каким-нибудь образом устранить сдвиг фаз между током и напряжением, то эта величина тока соответствовала бы потребляемой мощности 5 *квт*.

Подробнее о двигателях переменного тока см. гл. 12.

7-5. КОНДЕНСАТОРЫ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Мы знаем, что в цепи, составленной из источника постоянной э. д. с. и конденсатора, ток протекать не будет. Электродвижущая сила источника будет уравновешена напряжением между обкладками конденсатора. Напряжение на конденсаторе обусловлено наличием заряда на его обкладках. Величина заряда равна произведению емкости конденсатора и приложенного к нему напряжения.

Составим цепь из источника постоянной э. д. с., конденсатора и переключателя (рис. 7-7). Точки *а, б* могут по

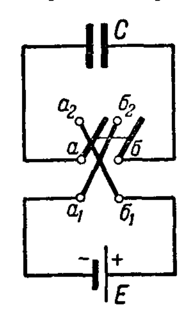


Рис. 7-7. Цепь, состоящая из источника постоянной э. д. с., конденсатора и переключателя. Когда переключатель соединяет зажимы *а* и *б* с зажимами a_1 и $б_1$, правая обкладка заряжается положительно, а левая отрицательно. Если же зажимы *а* и *б* соединены с зажимами a_2 и $б_2$, то положительный заряд получит левая обкладка конденсатора При непрерывном переключении конденсатора его обкладки будут перезаряжаться В цепи будут двигаться электроны — пойдет электрический ток.

нашему пожеланию присоединяться или к точкам a_1, $б_1$, или к точкам a_2, $б_2$. В первом случае правая обкладка конденсатора будет заряжаться положительно, а левая — отрицательно. Если же соединены зажимы *а, б* и a_2, $б_2$, то положительный заряд получит правая обкладка конденсатора.

Будем непрерывно переводить переключатель из одного положения в другое. Каждое переключение означает изменение полярности конденсатора. Чтобы зарядить или перезарядить конденсатор, нужно изменить количество электронов на его обкладках. В промежутке между двумя переключениями электроны проходят путь от одной обкладки до другой. Кратчайший путь закрыт диэлектриком, изолирующим одну обкладку от другой. Остается путь через генератор, и по нему будут двигаться заряды.

Итак, во внешней цепи будет происходить перемещение зарядов, т. е. протекать электрический ток. Направление

тока будет все время меняться, т. е. ток будет переменным. Величина тока будет тем больше, чем больше величина заряда, переносимого с обкладки на обкладку, и чем меньше время переноса.

Но

может ли электрический ток протекать в разомкнутой цепи?

Наш повседневный опыт дает на это отрицательный ответ. Чтобы погасить лампу, выключить радиоприемник, остановить двигатель, мы размыкаем цепь, после чего лампа гаснет, приемник замолкает, двигатель останавливается. В чем же здесь дело?

Дело в том, что разомкнутый выключатель представляет собой конденсатор с ничтожно малой емкостью. К зажимам выключателя подводится полное напряжение сети, и если напряжение переменное, то в подводящих проводах будет протекать ток, как это было показано выше. Но этот ток настолько мал, что он не нагреет нить лампы даже на одну сотую долю градуса и не сдвинет с места диск электрического счетчика.

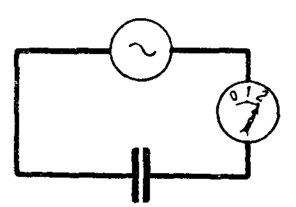


Рис. 7-8. Несмотря на то, что цепь переменного тока не замкнута, стрелка амперметра дает отклонение По проводам идет емкостный ток, перезаряжающий обкладки конденсатора.

Конденсатор в цепи синусоидального тока. Вернемся к схеме рис. 7-7 и заменим источник постоянной э. д. с. источником синусоидальной э. д. с. Переключатель становится лишним, так как и без него напряжение на конденсаторных обкладках будет менять свой знак. Получается схема рис. 7-8. Перезарядка конденсатора вызывает перемещение зарядов по цепи. Стрелка включенного в цепь амперметра дает отклонение.

Предположим, что сопротивление проводов, соединяющих генератор с конденсатором, весьма мало (толстые короткие провода). Тогда можно не считаться с происходящей в них потерей мощности. В самом конденсаторе мощность теряться не может, так как в нем нет тока проводимости. Тем не менее генератор загружен.

Нарисуем кривую напряжения на конденсаторе (рис. 7-9) Наибольшему напряжению соответствует и наибольшее значение заряда на обкладках конденсатора.

В тот момент, когда конденсатор разрядится полностью, напряжение между его обкладками сделается равным нулю. Короче говоря, величина напряжения изменяется вместе с величиной заряда — напряжение и заряд пропорциональны друг другу.

Если в цепи не происходит перемещения зарядов, то ток равен нулю. Чем быстрее уходят заряды с обкладок, тем больше разрядный ток; чем быстрее появляются заряды, тем больше зарядный ток конденсатора.

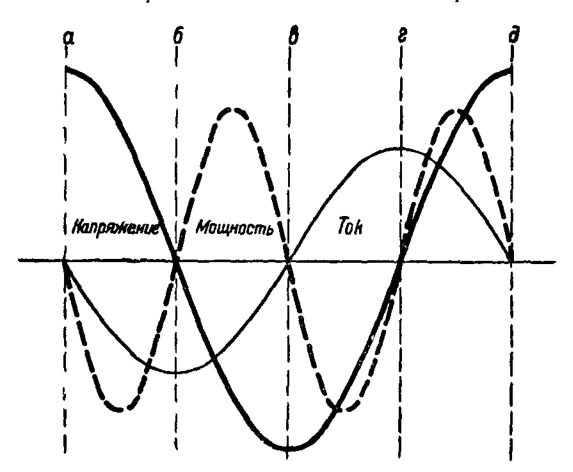


Рис. 7-9. Сдвиг фаз между напряжением и током конденсатора равен $^1/_4$ периода. Заряжаясь, конденсатор забирает энергию из сети, разряжаясь, возвращает ее обратно.
Средняя мощность равна нулю.

В момент времени *а* напряжение конденсатора, а следовательно, и его заряд достигли максимума. Притока новых зарядов уже нет. Ток равен нулю.

Далее заряды начинают уходить с обкладок конденсатора. В цепи протекает разрядный ток. Очевидно, что его направление прямо противоположно направлению конденсаторного напряжения: ведь сейчас ток стремится уменьшить величину напряжения.

К моменту времени *б* конденсатор полностью разрядится и начнет заряжаться вновь, но уже в противоположном направлении, т. е. с переменой знака зарядов на обкладках. Теперь ток и напряжение направлены одинаково, ибо ток стремится увеличить значение напряжения.

В момент времени *в* изменившее свой знак напряжение вновь достигает максимума, а величина тока спадает до нуля. Конденсатор начнет разряжаться.

Промежутки времени от *в* до *г* и от *г* до *д* соответствуют промежуткам времени от *а* до *б* и от *б* до *в*. Разница лишь в том, что направление напряжения на конденсаторе изменилось.

Сдвиг фаз между током и напряжением. Сопоставим полученные результаты с результатами рис. 7-6. В обоих случаях фазовый сдвиг между напряжением и током составляет четверть периода (90°). Но есть и существенное различие. Ток индуктивного потребителя (рис. 7-6) отстает от напряжения на 90°. Это значит, что максимум тока наступает через четверть периода после того, как наступил максимум напряжения. Ток емкостного потребления, т. е. конденсатора, опережает напряжение на 90°; это значит, что максимум тока наступает за четверть периода до того, как наступит максимум напряжения.

Действительно, если положить начальную фазу напряжения на конденсаторе и на катушке самоиндукции равной нулю, то фаза тока в конденсаторе будет +90°, а фаза тока в индуктивности —90°. Токи в конденсаторе и индуктивности в начальный момент имеют максимальные значения, но разные знаки.

Ток в конденсаторе имеет положительное значение, ток в индуктивности — отрицательное.

В следующие моменты времени напряжение растет, приближаясь к своему амплитудному значению, а ток в конденсаторе уменьшается от амплитудного значения до нуля. Следовательно, максимум тока в конденсаторе достигается раньше максимума напряжения —

ток в конденсаторе опережает напряжение.

Напряжение пройдет свой максимум прежде, чем ток в индуктивности достигнет своего положительного максимума. Следовательно, максимум тока в индуктивности достигается позже максимума напряжения —

ток в индуктивности отстает от напряжения.

7-6. КОМПЕНСАЦИЯ СДВИГА ФАЗ

Параллельное включение индуктивности и емкости. Посмотрим, что будет, если соединить параллельно индуктивный и емкостный потребители (рис. 7-10). В качестве ин-

дуктивного потребителя возьмем двигатель, рабочий ток которого мы определяли в примере предыдущего параграфа. Мы нашли, что действующее значение тока равно 22,7 *а*.

Максимальное значение тока равно его амплитудному значению, которое в $\sqrt{2}$ раз больше действующего (§ 6-7), т. е. максимальный ток равен 32,2 *а* ($22,7 \cdot \sqrt{2} = 32,2$).

Аналогично максимальное значение напряжения равно 311 *в* при действующем значении 220 *в* ($220 \cdot \sqrt{2} = 311$).

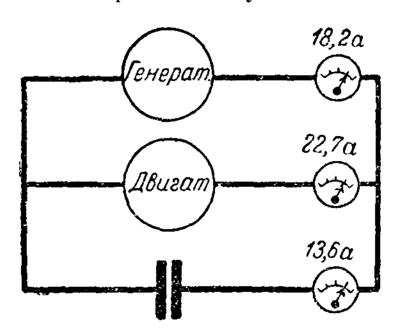


Рис. 7-10. Нагрузкой генератора являются двигатель и конденсатор. Показания амперметра в цепи генератора меньше не только суммы показаний амперметров обоих потребителей, но и показания амперметра в цепи двигателя.

В качестве емкостного потребителя возьмем конденсатор, зарядный ток которого при максимальном напряжении 311 *в* равен 19,3 *а* (максимальное значение).

Ток генератора равен сумме токов обоих потребителей. На рис. 7-11 показаны токи обоих потребителей и ток генератора. Оказывается, что ток генератора находится в фазе с его напряжением, т. е. сдвиг фаз уничтожился.

Мы пришли к замечательному результату: параллельное присоединение надлежащим образом рассчитанных конденсаторов уничтожает сдвиг фаз между током и напряжением, улучшает коэффициент мощности; он теперь равен единице. Генератор уже не обменивается энергией с потребителем.

Выгода, получаемая при компенсации сдвига фаз. Но куда же девается энергия, запасаемая в магнитном поле индуктивного потребителя? — Она превращается в энергию электрического поля конденсатора. А так как конденсатор не потребляет запасенной в нем энергии, то происходит ее обратное превращение в энергию магнитного поля.

Переброска энергии продолжается, но обмениваются энергией оба потребителя, минуя генератор и линию передачи. Ни генератор, ни линия не участвуют в этой «игре»: генератор уже не вырабатывает той энергии, которая не

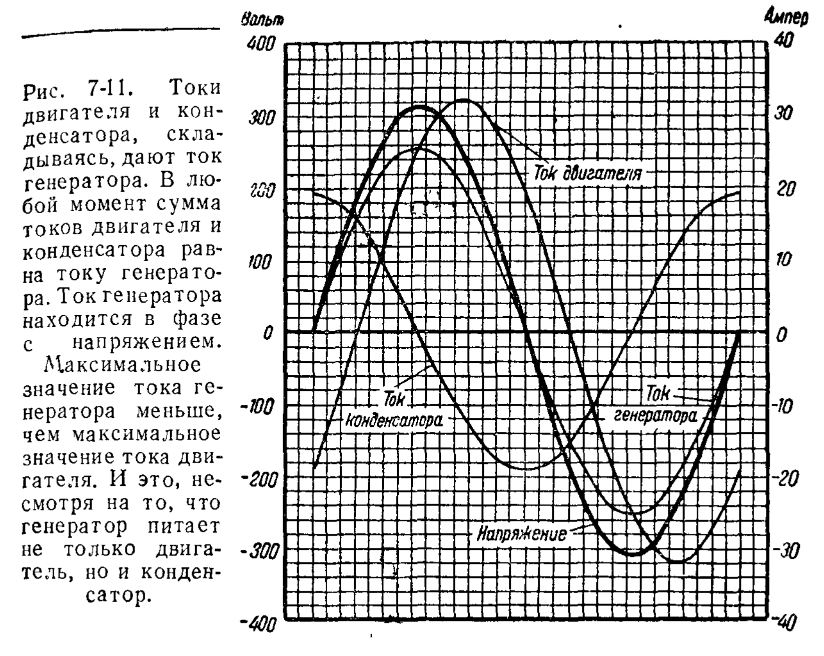


Рис. 7-11. Токи двигателя и конденсатора, складываясь, дают ток генератора. В любой момент сумма токов двигателя и конденсатора равна току генератора. Ток генератора находится в фазе с напряжением. Максимальное значение тока генератора меньше, чем максимальное значение тока двигателя. И это, несмотря на то, что генератор питает не только двигатель, но и конденсатор.

может быть потреблена в цепи, а линия не передает ее. Потери, связанные с передачей энергии, сокращаются.

В этом — прямая выгода компенсации сдвига фаз.

7-7. РАСЧЕТ ПРОСТЕЙШИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Два примера. Рассмотрим цепь, показанную на рис. 7-12. К источнику переменного напряжения присоединены катушки *К* и измерительные приборы — амперметр, вольтметр и ваттметр. Пусть показания этих приборов соответственно равны 5 *а*, 120 *в* и 360 *вт*.

Прежде всего обращает на себя внимание несоответствие показаний этих приборов. Казалось бы, что току в 5 *а* и напряжению 120 *в* должна соответствовать мощность 600 *вт*. Ваттметр же показывает 360 *вт*.

Причина этого несоответствия была разъяснена на стр. 250: потребитель — в данном примере катушка — возвращает генератору часть энергии, и, следовательно, в цепи должен существовать сдвиг фаз. Коэффициент мощности оказывается равным:

$$\cos\varphi = \frac{360}{5\cdot 120} = 0{,}6.$$

Заменим катушку K катушкой K_1. Пусть в этом случае приборы покажут 10 *а*, 120 *в* и 300 *вт*. Спросим себя, облегчились ли условия работы генератора от такой замены?

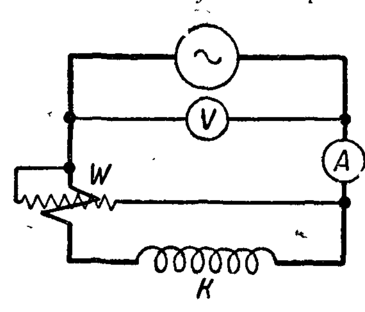


Рис. 7-12. К генератору присоединены катушка индуктивности и приборы для измерения мощности W (ваттметр), напряжения V (вольтметр) и тока A (амперметр).

На первый взгляд может показаться, что, поскольку мощность уменьшилась с 360 до 300 *вт*, нагрузка генератора также уменьшилась и второй режим легче первого. Но такое заключение было бы ошибочным, так как ток генератора возрос вдвое. Например, если обмотка генератора рассчитана на длительное протекание тока 8 *а*, то второй режим надо признать недопустимым.

Полная мощность генератора. Итак, нагрузка генератора определяется проходящим по его обмотке током. На практике чаще оценивают нагрузку генератора произведением тока и напряжения:

$$S = U \cdot I.$$

Это произведение носит название полной мощности генератора.

Полная мощность генератора является важной его характеристикой. Как мы уже выяснили, каждый генератор может отдавать ток, не превосходящий определенной величины. Следовательно, если величина напряжения генератора имеет определенное значение, то при любом характере нагрузки нельзя без риска повредить генератор превысить допустимое значение кажущейся мощности.

Чем больше полная мощность генератора, тем больше греется обмотка генератора

или, как говорилось выше,

тем сильнее нагружен генератор.

Активная мощность. Очевидно, что максимальная полезная мощность, отдаваемая генератором в нагрузку, также не может превосходить допустимую кажущуюся мощность и лишь в случае отсутствия сдвига фаз может быть ей равна.

Мощность, забираемую потребителем,

$$P = U \cdot I \cos\varphi$$

называют активной мощностью. Во избежание путаницы полную мощность измеряют не в ваттах, а в вольт-амперах (*ва*).

Так, в наших примерах полная мощность составляла 600 *ва* в первом случае и 1 200 *ва* во втором случае. Ясно, что для генератора второй режим тяжелее первого. Каждый генератор рассчитан на определенную величину полной мощности.

Отметим еще, что отношение активной и полной мощностей равно коэффициенту мощности:

$$\frac{P}{S} = \cos\varphi.$$

Теперь поставим себе задачу найти омическое, реактивное и полное сопротивления обеих катушек. В первом случае полное сопротивление будет:

$$z = \frac{U}{I} = \frac{120}{5} = 24 \text{ ом},$$

а во втором

$$z_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{120}{10} = 12 \text{ ом}.$$

Омическое сопротивление катушек может быть найдено при помощи закона Ленца — Джоуля: $P = I^2 r$. Разделив обе части этого равенства на величину тока, мы придем к соотношению: $U \cos\varphi = Ir$. Далее, приняв во внимание, что частное от деления напряжения на ток равно полному сопротивлению, найдем окончательно:

$$r = z \cos\varphi,$$

откуда для первой катушки получается 14,4 *ом* и для второй 3 *ом*.

Наконец, реактивное сопротивление катушек найдем, применив теорему Пифагора к треугольнику сопротивлений (стр. 243). Получается для первой катушки

$$x = \sqrt{24^2 - 14{,}4^2} = 19{,}2 \text{ ом}$$

и для второй катушки

$$x_1 = \sqrt{12^2 - 3^2} = 11{,}6 \text{ ом}.$$

7-8. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ДВУХ КАТУШЕК

Теперь соединим обе катушки последовательно. Омическое сопротивление обеих катушек будет равняться сумме омических сопротивлений, т. е.

$$14{,}4+3=17{,}4\ \text{ом}.$$

Но нельзя складывать арифметически полные сопротивления обеих катушек. Следовательно, величина тока, который будет проходить в цепи, нам пока неизвестна. Но ясно, что обе катушки будут иметь одинаковый ток. Обозначим его через I.

В первой катушке возникает напряжение самоиндукции, равное $I \cdot x$, т. е. $19{,}2 \cdot I$ [*в*]. Напряжение самоиндукции во второй катушке составит $11{,}6 \cdot I$ [*в*]. Оба напряжения действуют в одной и той же цепи, и, следовательно, суммарное напряжение самоиндукции составит:

$$19{,}2 \cdot I+11{,}6 \cdot I=30{,}8 \cdot I\ [в],$$

и этому соответствует реактивное сопротивление 30,8 *ом*.

Полное сопротивление обеих катушек при их последовательном соединении будет равно:

$$\sqrt{17{,}4^2+30{,}8^2}=35{,}4\ \text{ом},$$

откуда ток в цепи

$$I=\frac{120}{35{,}4}=3{,}39\ a;$$

полная мощность

$$S=120 \cdot 3{,}39=407\ \text{ва};$$

коэффициент мощности

$$\cos\varphi=\frac{17{,}4}{35{,}4}=0{,}492$$

и активная мощность

$$P=407 \cdot 0{,}492=200\ \text{вт}.$$

Реактивная мощность. Теперь составим цепь из катушки K и конденсатора C, соединенных параллельно (рис. 7-13). Конденсатор должен быть выбран с таким расчетом, чтобы ток генератора был в фазе с его напряжением (стр. 256).

По аналогии с активной мощностью

$$P = UI\cos\varphi = I^2 r$$

и полной мощностью

$$S = UI = I^2 z$$

мы назовем **реактивной мощностью** произведение квадрата тока и реактивного сопротивления

$$Q = I^2 x.$$

Так как

$$z = \sqrt{r^2 + x^2},$$

то

$$S = I^2 z = I^2\sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

При отсутствии сдвига фаз реактивная мощность равна нулю и полная мощность равна активной. Наоборот, там, где сдвиг фаз составляет четверть периода, как, например, в цепи конденсатора, там нулю равна активная мощность и полная мощность равна реактивной.

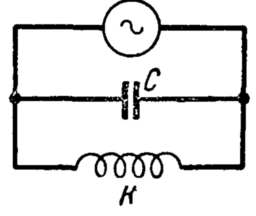


Рис. 7-13. Катушка и конденсатор соединены параллельно.

Компенсация сдвига фаз в цепи генератора наступит в том случае, когда реактивные мощности катушки и конденсатора будут равны друг другу. Так как в схемах рис. 7-12 и 7-13 катушка находится в одинаковых условиях (напряжение на ее зажимах одинаково), то реактивная мощность катушки в схеме рис. 7-13

$$Q = 5^2 \cdot 19{,}2 = 480 \ \textit{вар},$$

т. е. реактивных вольт-ампер.

В цепи конденсатора это значение будет совпадать с полной мощностью, и, следовательно, ток в цепи конденсатора

$$I = \frac{480}{120} = 4 \ a,$$

откуда реактивное сопротивление конденсатора

$$x_C = \frac{120}{4} = 30 \ \textit{ом}.$$

Отметим, что емкость конденсатора (в микрофарадах) может быть (при частоте 50 *гц*) найдена по формуле

$$C = \frac{3\,180}{x_C},$$

откуда можно найти, что $C = 106$ *мкф*.

Ток генератора найдется из условия равенства активной и полной мощностей. Так как активная мощность в нашем примере равна 300 *вт*, то ток генератора будет равен 3 *а*.

7-9. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Резонансом токов называют явление при параллельном соединении индуктивности и емкости, при котором ток и напряжение в генераторе совпадают по фазе (компенсация сдвига фаз), т. е. мощность генератора чисто активная.

При компенсации сдвига фаз или, как говорят, резонансе частота свободных колебаний контура, образованного конденсатором и индуктивностью, приблизительно равна частоте тока (стр. 211). Частоту свободных колебаний контура L, C называют собственной частотой контура. Так же как и для емкости, можно вычислить величину индуктивности, если известно ее реактивное сопротивление. Для этого существует формула

$$L = 3{,}18 x_L,$$

в которой x_L — индуктивное сопротивление при промышленной частоте — выражено в омах, а индуктивность L — в миллигенри.

Пример 1. В § 7-6 мы рассмотрели параллельное включение конденсатора и индуктивного приемника.

Реактивное сопротивление этого конденсатора можно найти как отношение напряжения к току

$$x_C = \frac{U}{I} = \frac{311}{19{,}3} = 16{,}1 \text{ ом}.$$

Заметим, что так же вычисляется полное сопротивление. Но конденсатор не потребляет активной мощности — в нем активное сопротивление равно нулю. Поэтому из треугольника сопротивлений (рис. 7-2) следует, что полное сопротивление конденсатора равно реактивному.

Емкость конденсатора, сопротивление которого 16,1 *ом*, может быть определена по формуле предыдущего параграфа:

$$C = \frac{3\,180}{16{,}1} = 197{,}5 \text{ мкф}.$$

Полное сопротивление индуктивной нагрузки (двигателя) равно:

$$z = \frac{311}{32,2} = 9,7 \text{ ом.}$$

Коэффициент мощности двигателя равен 0,8 (§ 7-4). Поэтому активное сопротивление двигателя равно:

$$r = z \cos\varphi = 9,65 \cdot 0,8 = 7,73 \text{ ом.}$$

При этом реактивное сопротивление x_L двигателя равно (рис. 7-2)

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2} = 5,82 \text{ ом},$$

а индуктивность

$$L = 3,18 \cdot 5,82 = 18,5 \text{ мгн.}$$

Подсчитаем собственную частоту контура, состоящего из двигателя и конденсатора (§ 5-8),

$$f_0 = \frac{0,159}{\sqrt{LC}} = \frac{0,159}{\sqrt{18,5 \text{ мгн} \cdot 197,5 \text{ мкф}}} = 83 \text{ гц},$$

т. е. не намного больше промышленной частоты переменного тока.

Пример 2. Рассмотрим другой случай (§ 7-7). Катушка индуктивности K_1 подключена к сети 120 *в*. Ток в катушке равен 10 *а*; мощность, потребляемая катушкой, 300 *вт*.

Тогда коэффициент мощности оказывается равным:

$$\cos\varphi = \frac{300}{10 \cdot 120} = 0,25.$$

Опыт показывает, что для компенсации сдвига фаз нужно подключить емкость, которая при том же напряжении 120 *в* потребляет ток 9,68 *а*.

Заметим тут же, что для определения тока I_C, который должен был бы протекать в конденсаторе, если ток в индуктивной нагрузке равен I_L, а коэффициент мощности $\cos\varphi$, можно воспользоваться точной формулой

$$I_C = I_L \sqrt{1 - (\cos\varphi)^2}.$$

Несколько проще другая приближенная формула

$$I_C = I_L - 0,5 I_L \cos\varphi = I_L [1 - 0,5 (\cos\varphi)^2],$$

вычисляя по которой мы ошибаемся не более чем на 10%, если коэффициент мощности меньше 0,6. При бо́льшем коэффициенте мощности необходимо пользоваться точной формулой.

Определим емкость конденсатора и индуктивность катушки Сопротивление и емкость конденсатора

$$x_C = \frac{120}{9,68} = 12,4 \text{ ом};$$

$$C = \frac{3\,180}{12,4} = 257 \text{ мкф.}$$

Сопротивления и индуктивность катушки

$$z = \frac{120}{10} = 12 \text{ ом};$$

$$r = z \cos \varphi = 3 \text{ ом};$$

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2} = \sqrt{144 - 9} = 11{,}6 \text{ ом};$$

$$L = 3{,}18 \cdot 11{,}6 = 36{,}9 \text{ мгн}.$$

Следовательно, собственная частота равна:

$$f_0 = \frac{0{,}159}{\sqrt{257 \text{мкф} \cdot 36{,}9 \text{мгн}}} = 51{,}7 \text{ гц},$$

т. е. *собственная частота контура приближенно равна частоте тока.*

Сравним последний пример с предыдущим. В предыдущем примере при резонансе токов коэффициент мощности равнялся 0,8, а собственная частота контура была в 1,7 раза больше частоты тока. В последнем примере коэффициент мощности был равен 0,25, а собственная частота была всего в 1,03 раза больше частоты тока.

Расчеты показывают и опыт подтверждает, что

при резонансе токов чем меньше коэффициент мощности индуктивного приемника, тем меньше отличается собственная частота контура от частоты переменного тока.

Заметим также, что собственная частота контура при резонансе токов всегда превышает частоту переменного тока, при которой наблюдается резонанс.

В § 7-6 мы выяснили, что компенсация сдвига фаз выгодна, так как для получения той же мощности в нагрузке необходимо по проводам передавать меньший ток, т. е. уменьшить потери в линии.

Уменьшить потери в линии — значит сэкономить электроэнергию, бесполезно расходуемую на нагревание проводов.

При огромной потребности наших заводов и фабрик в электроэнергии борьба за повышение коэффициента мощности имеет большое значение.

Поэтому необходимо каждому электрику знать формулы, по которым можно определить емкость, которую необходимо подключить для повышения коэффициента мощности до 1,0.

Расчет приводит к следующей формуле:

$$x_C = \frac{z}{\sqrt{1-(\cos\varphi)^2}},$$

где x_C — сопротивление конденсатора;

z — полное сопротивление индуктивной нагрузки;

$\cos\varphi$ — коэффициент мощности индуктивной нагрузки.

Обычно $\sqrt{1-(\cos\varphi)^2}$ обозначают $\sin\varphi$ (читай: синус фи), т. е.

$$\sin\varphi = \sqrt{1-(\cos\varphi)^2}.$$

Тогда формула может быть записана в виде:

$$x_C = \frac{z}{\sin\varphi}.$$

Если неизвестны полное сопротивление и коэффициент мощности, а известны ток I, напряжение U и активная мощность P, необходимо сначала определить по ним z и $\cos\varphi$.

Для определения емкости конденсатора следует пользоваться приведенной ранее формулой:

$$C = \frac{3\,180}{x_C} \text{ [мкф]}.$$

Необходимо при этом помнить, что эта формула пригодна только для определения емкости при промышленной частоте (50 *гц*). При другой частоте переменного тока вычисление необходимо производить по другой формуле:

$$C = \frac{159\,000}{f x_C},$$

где C — по-прежнему емкость, *мкф*;

x_C — сопротивление конденсатора при частоте переменного тока f, выраженной в герцах.

Пример 3. Компенсация сдвига фаз при повышенной частоте. Рассмотрим случай, когда генератор дает переменный ток с частотой 400 *гц* и напряжением 110 *в*. Мощность индуктивной нагрузки 88 *вт*, потребляемый ток 2 *а*.

Сопротивление нагрузки

$$z = \frac{U}{I} = \frac{110}{2} = 55 \text{ ом}.$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI} = \frac{88}{110 \cdot 2} = 0{,}4;$$

следовательно,

$$\sin\varphi = \sqrt{1-(\cos\varphi)^2} = \sqrt{1-0{,}4^2} = \sqrt{1-0{,}16} = \sqrt{0{,}84} = 0{,}92.$$

Тогда необходимое сопротивление емкости будет:

$$x_C = \frac{z}{\sin\varphi} = \frac{55}{0{,}92} = 60\ \textit{ом},$$

величина емкости

$$C = \frac{159\,000}{fx_C} = \frac{159\,000}{400 \cdot 60} = 6{,}6\ \textit{мкф}.$$

Соотношение между токами в нагрузке и в линии при резонансе токов. В § 7-6 мы уже познакомились с тем, что протекающий в линии ток может быть меньше тока в индуктивной нагрузке. Расчеты показывают, что при резонансе токов ток в индуктивной нагрузке I_L связан с током в линии I следующей зависимостью:

$$I = I_L \cos\varphi$$

или, что то же самое,

$$I_L = \frac{I}{\cos\varphi}.$$

В первом примере коэффициент мощности равен 0,8. Поэтому ток в нагрузке больше тока в линии в 1,25 раза:

$$I_L = \frac{I}{0{,}8} = 1{,}25\,I.$$

Во втором и третьем примерах коэффициенты мощности соответственно равны 0,25 и 0,4. Следовательно,

$$I_L = \frac{I}{0{,}25} = 4I$$

и

$$I_L = \frac{I}{0{,}4} = 2{,}5I$$

— токи в нагрузках больше тока в линиях в 4 и 2,5 раза!

При еще меньших коэффициентах мощности это соотношение может быть еще бо́льшим. Так, например, при

коэффициенте мощности индуктивной нагрузки, равном 0,1, при резонансе ток в нагрузке больше тока в линии в 10 раз:

$$I_L = \frac{I}{0,1} = 10I.$$

В радиоприемниках и других радиотехнических приборах применяют резонансные контуры из емкости и индуктивности, в которых коэффициент мощности индуктивности значительно меньше единицы (например, $\cos\varphi = 0{,}01$). В таких контурах ток может превосходить ток в линии в сотни раз.

Емкость кабельной линии передачи. В кабельной линии передачи расстояние между жилами (проводами) невелико. Поэтому большую роль играет емкость между жилами кабеля. Нам уже известно, что емкость между двумя проводниками будет тем больше, чем меньше расстояние между ними.

При обычно принятом расстоянии между жилами кабеля сопротивление емкости кабеля в 1 *км* примерно равно 10 *ом*.

Если нагрузка на конце кабеля индуктивная, то генератор окажется как бы включенным на параллельное соединение емкости кабеля и индуктивности нагрузки. При этом также может иметь место резонанс токов. При эксплуатации кабельных линий необходимо это учитывать.

7-10. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Индуктивность линии передачи. Воздушная линия передачи обладает индуктивностью. Действительно, линия передачи образует как бы виток, размеры которого тем больше, чем длиннее линия и чем больше расстояние между проводами. Поэтому при расчете воздушной линии передачи приходится учитывать не только ее активное сопротивление, но и индуктивное сопротивление.

Очевидно, что схема, по которой необходимо вести расчет, может быть представлена в виде последовательно соединенных: генератора, полного сопротивления линии и полного сопротивления нагрузки z. Если нагрузка индуктивная, то расчет цепи сводится к расчету двух последовательно соединенных катушек индуктивности. Этот расчет был проведен нами в § 7-7.

Представим себе, что наша нагрузка имеет характер емкости — на конце линии включен, например, конденса-

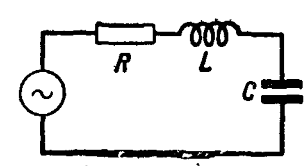


Рис. 7-14. Полное сопротивление воздушной линии (r, L) включено последовательно с нагрузкой в виде конденсатора.

тор. Тогда вид схемы будет таким (рис. 7-14): к генератору последовательно приключены полное сопротивление линии r, L и нагрузка в виде конденсатора C.

Пример. Пусть полное сопротивление линии состоит из активного сопротивления 5 *ом* и индуктивного сопротивления 40 *ом**. Сопротивление конденсатора нагрузки 10 *ом*.

Так как линия и конденсатор соединены последовательно, то протекающий по ним ток один и тот же в каждый момент времени. Напряжение на активном сопротивлении линии находится в фазе с током. Мы уже знаем, что напряжение на индуктивности опережает ток на 90°, а напряжение на конденсаторе отстает от тока на 90° (§ 7-5).

Следовательно, разность фаз напряжений на индуктивности и на емкости равна 180°. В этом случае напряжение на индуктивности будет иметь другой знак, чем напряжение на емкости.

Общее напряжение на индуктивности и емкости может быть найдено как алгебраическая сумма напряжений на индуктивности

$$U_L = Ix_L$$

и на емкости

$$U_C = Ix_C.$$

Общее напряжение U будет равно:

$$U = Ix_L - Ix_C.$$

Множитель I можно вынести за скобки:

$$U = I(x_L - x_C).$$

Если мы хотим определить равноценное реактивное сопротивление x, то при протекании тока I по этому сопротивлению должно быть то же напряжение

$$U = Ix.$$

Сравнивая последние два равенства приходим к выводу, что

реактивное сопротивление, равноценное двум последовательно соединенным индуктивному и емкостному сопротивлениям, равно их разности,

* Приблизительно такие сопротивления имеет 35-*кв* воздушная линия передачи длиной 100 *км* с сечением провода 35 *мм*^{2}.

т. е.

при последовательно соединенных индуктивности и емкости их общее сопротивление может быть меньше каждого из них.

Характер равноценного сопротивления определяется тем, какое из сопротивлений индуктивности или емкости больше.

Если

индуктивное сопротивление больше емкостного, то равноценное им сопротивление также будет индуктивным.

Если

емкостное сопротивление больше индуктивного, то равноценное сопротивление будет емкостным.

В нашем примере равноценное сопротивление равно:

$$x = x_L - x_C = 40 - 10 = 30 \text{ ом}.$$

Определим полное сопротивление линии и нагрузки, взятых вместе:

$$z_л = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{5^2 + 30^2} = \sqrt{25 + 900} = \sqrt{925} = 30{,}4 \text{ ом}.$$

Сравним это сопротивление с полным сопротивлением линии. Полное сопротивление линии равно:

$$z_л = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{5^2 + 40^2} = \sqrt{1\,625} = 40{,}3 \text{ ом}.$$

Получается так, что если бы на конце линии было короткое замыкание, ток в линии был бы меньше, чем в случае подключения конденсатора „нагрузки"[1].

Теперь сравним коэффициенты мощности линии передачи с нагрузкой и без нагрузки. Коэффициент мощности линии передачи с нагрузкой

$$\cos\varphi = \frac{r}{z} = \frac{5}{30{,}4} = 0{,}1645$$

оказывается бо́льшим коэффициента мощности линии без нагрузки

$$\cos\varphi = \frac{r}{z_л} = \frac{5}{40{,}3} = 0{,}1240.$$

Следовательно, сдвиг фаз между током и напряжением при включении конденсатора у м е н ь ш а е т с я[2].

---

[1] Так как полное сопротивление одной линии больше полного сопротивления линии с нагрузкой (конденсатором).

[2] Внимательный читатель, по-видимому, уже заметил, что в этих рассуждениях много общего с рассуждениями о резонансе токов.

Спросим себя, при каких условиях этот сдвиг фаз окажется равным нулю. Очевидно что сдвиг фаз будет равен нулю в том случае, если равноценное сопротивление последовательно включенных индуктивности и емкости будет равно нулю:

$$x = 0,$$

а это возможно только в том случае, если

$$x_L = x_C.$$

При этом полное сопротивление будет равно активному сопротивлению линии. Сдвиг фаз между током и напряжением на генераторе окажется равным нулю. Это и есть резонанс напряжения.

Таким образом,

резонансом напряжения называется такое явление в последовательно включенных индуктивности и емкости, при котором сдвиг фаз между напряжением и током равен нулю,

т. е.

мощность, отдаваемая генератором, чисто активная.

Нами уже определено условие возникновения резонанса напряжения: $x_C = x_L$. Последнее есть не что иное, как условие для определения собственной частоты контура, т. е. частоты свободных колебаний.

Следовательно,

при резонансе напряжений собственная частота контура равна частоте переменного тока, питающего контур[1].

Соотношение между напряжением генератора и напряжением на емкости. Напряжение на емкости равно произведению тока и сопротивления емкости:

$$U_C = Ix_C.$$

С другой стороны, напряжение генератора равно произведению тока и полного сопротивления линии с нагрузкой:

$$U = Iz = I\sqrt{r^2 + x^2} = I\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}.$$

---

[1] См. § 5-8

Отношение напряжения на емкости к напряжению генератора равно, таким образом,

$$\frac{U_C}{U}=\frac{x_C}{z},$$

или

$$\frac{U_C}{U}=\frac{x_C}{\sqrt{r^2+(x_L-x_C)^2}}.$$

Общий множитель числителя и знаменателя I мы сократили.

При резонансе это отношение упрощается, так как $x_L-x_C=0$:

$$\frac{U_C}{U}=\frac{x_C}{r}.$$

В рассмотренном нами примере $r=5$ *ом*; при резонансе сопротивление емкости должно было бы быть $x_C=$ $=40$ *ом*; следовательно,

$$\frac{U_C}{U}=\frac{40}{5}=8$$

— напряжение на емкости окажется в восемь раз больше напряжения генератора!

Подобно тому как при резонансе токов ток в генераторе может быть меньше тока в конденсаторе, так и

при резонансе напряжений напряжение на конденсаторе может быть больше напряжения генератора.

7-11. ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА РАССТОЯНИЕ

Мы неоднократно подчеркивали, что одной из наиболее существенных задач техники является передача энергии на расстояние.

Схема передачи энергии ясна: находящийся в месте сосредоточения запасов топлива (или иных источников энергии) генератор преобразует энергию вращения своего вала в электромагнитную энергию Электромагнитная энергия доставляется по проводам линии передачи к потребителю Этим потребителем могут быть электродвигатели, осветительные установки, электрические печи и т. д

Основная трудность, возникающая при передаче всякой, в том числе и электромагнитной энергии, заключается в необходимости предотвратить ее рассеяние в окружающую среду.

Коэффициент полезного действия. Избежать потерь в линиях передачи нельзя. Приходится лишь заботиться об их снижении.

Наличие потерь в линии приводит к тому, что мощность, получаемая потребителем, будет меньше той мощности, которая вырабатывается генератором. Разница в мощностях пойдет на покрытие потерь.

Отношение

$$\frac{\textit{мощность, доставленная потребителю}}{\textit{мощность, выработанная станцией}}$$

называется отдачей или коэффициентом полезного действия (к. п. д.) линии. Это отношение всегда меньше единицы (знаменатель дроби больше числителя). Чем выше к. п. д. линии, тем меньше бесполезных потерь.

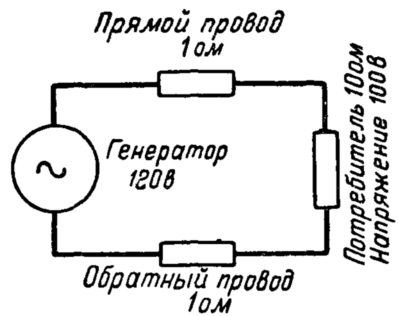


Рис. 7-15. В проводах неизбежна потеря напряжения. Благодаря этому напряжение у потребителя меньше, чем напряжение генератора.

Мы знаем, что мощность будет тем больше, чем больше напряжение, ток и коэффициент мощности ($\cos \varphi$). Если напряжение, ток и $\cos \varphi$ у потребителей были бы теми же, что и на станции, то передача энергии происходила бы без потерь.

Закон Ома вскрывает причину потерь напряжения в линии. Провода линии передачи всегда обладают сопротивлением. Протекание по ним тока обусловливает падение напряжения. Потребитель получает пониженное напряжение, а следовательно, и пониженную мощность. Эти рассуждения легко проверить на числовом примере.

Генератор, напряжение которого 120 *в*, питает нагревательный прибор (рис. 7-15). Сопротивление прибора 10 *ом*. Провода, соединяющие генератор с прибором, имеют сопротивление по 1 *ом* каждый. Общее сопротивление цепи составляет, таким образом, $10+1+1=12$ *ом*.

Ток в цепи определяется по закону Ома:

$$I=\frac{120\ в}{12\ ом}=10\ a.$$

Напряжение, потерянное в проводах, равно 10 *а* · 1 *ом* = = 10 *в* в прямом проводе и столько же в обратном. Полная потеря напряжения составит 20 *в*. Чтобы найти напряжение у потребителя, надо вычесть из генераторного напряжения потерю напряжения в линии. На долю потребителя останется, таким образом, 120 *в*—20 *в* = 100 *в*.

Мощность, вырабатываемая генератором, равна произведению напряжения генератора на ток цепи, т. е. 120 *в* · 10 *а* = 1 200 *вт*, или 1,2 *квт*. Мощность, доставляемая потребителю, равна произведению напряжения у потребителя на ток цепи, т. е. 100 *в* · 10 *а* = 1 000 *вт*, или 1 *квт*. Потеря мощности в линии составляет 200 *вт*, а к. п. д. линии равен $\frac{1\,000\ вт}{1\,200\ вт}=0{,}833$, или 83,3%.

В этом подсчете мы предполагали, что сдвиг фаз между током и напряжением потребителя отсутствует. Нетрудно убедиться в том, что наличие сдвига фаз у потребителя снизило бы дополнительно к. п. д. линии передачи. В самом деле, дополнительная передача энергии от генератора к потребителю и обратно — от потребителя к генератору — привела бы к тому, что та же мощность передавалась бы током большей величины, а следовательно, и потери в линии увеличились бы. Попутно отметим, что борьба за высокий коэффициент мощности есть одновременно борьба за лучшее использование линий передачи, за увеличение их к. п. д.

Как бороться с потерей напряжения, а следовательно, и с потерей мощности в линии?

Закон Ома подсказывает решение вопроса. Так как потеря напряжения в линии равна произведению тока и сопротивления проводов, то надо подумать, как уменьшить величины сопротивления и тока.

Сопротивление провода равно:

$$\frac{\rho\ (\textit{удельное сопротивление}) \times l\ (\textit{длина провода})}{S\ (\textit{сечение провода})}.$$

Следовательно, материал провода должен иметь малое удельное сопротивление. Этому требованию удовлетворяют, например, медь и алюминий. Далее, длина проводов должна быть как можно меньше. Но не всегда можно удовлет-

ворить этому условию. Ведь длина проводов определяется расстоянием от электростанции до потребителя, расположение же электростанции определяется близостью источников энергии (топливных и водяных). Все, что мы можем сделать, — это выбрать наиболее короткую трассу линии.

Напряжение линии передачи. Наконец, уменьшение сопротивления линии можно достигнуть увеличением сечения проводов. Но здесь возникает новое осложнение. Увеличение сечения увеличивает количество меди, потребной для изготовления проводов, т. е. удорожает стоимость линии. Если взять сечение проводов слишком большим, то расходы по сооружению линии поглотят ту экономию, которую мы получим от уменьшения потерь в линии. Поэтому сечение проводов можно увеличивать лишь до известного предела.

Остается уменьшить ток, но при этом нельзя забывать, что потребитель требует от нас определенной мощности. Эту мощность мы должны ему доставить. Можно ли при этих условиях уменьшать величину тока?

Оказывается, что можно. Ведь передаваемая мощность зависит не только от тока, но и от напряжения. Если уменьшить величину тока, скажем, в 10 раз, то достаточно увеличить напряжение также в 10 раз, чтобы величина передаваемой мощности осталась неизменной.

Мы пришли к весьма важному выводу:

уменьшение потерь в линии достигается увеличением напряжения, при котором происходит передача энергии.

Вот почему мы строим линии передачи высокого напряжения. Обычно линии передачи бывают воздушные и реже кабельные — из-за более высокой стоимости.

Ясно, что применение высоких напряжений усложняет конструкцию линий передачи. Всякое же усложнение конструкции должно быть оправдано. Поэтому уместно поставить вопрос, до каких пор следует повышать рабочее напряжение линии.

Обратимся к только что разобранному примеру. Пусть расстояние между генератором и потребителем увеличилось вчетверо. Очевидно, что во столько же раз увеличилось сопротивление проводов. Подсчитаем, какое напряжение следует поддерживать на станции, чтобы та же мощность — в нашем примере 1 *квт* — передавалась при тех же потерях.

Потери в проводах по закону Ленца — Джоуля равны I^2r [*вт*]. Увеличение сопротивления в 4 раза означает, что ток должен уменьшиться вдвое. Чтобы сохранить неизменной передаваемую мощность, необходимо повысить напряжение в 2 раза.

Подсчет этот является, конечно, приблизительным, так как в нем не принято во внимание влияние сдвига фаз между напряжением и током. Но совершенно очевидно, что чем длиннее линия передачи, тем бо́льшим должно быть ее рабочее напряжение. Так, например, линия Куйбышев—Москва при длине около 1 000 *км* осуществлена на рабочее напряжение 400 000 *в*. Свирские гидростанции удалены от Ленинграда на 240 и 270 *км* и передают энергию при напряжении 220 *кв*, т. е. 220 000 *в*. Шатурская станция удалена от Москвы на 130 *км*, и передача энергии происходит при напряжении 115 *кв*. Линии длиной 40—50 *км* работают обычно при напряжении 35 *кв* и т. д. Конечно, с ростом длины линии удорожается передача энергии. Передавать на большие расстояния дорогостоящую энергию нет смысла. Но дешевая энергия, например энергия больших быстроходных рек, может с выгодой передаваться на сотни километров.

Главное усложнение, возникающее в результате применения высоких напряжений, — это необходимость обеспечить надежную изоляцию линии. Перекрытия изоляторов вроде показанного на рис. 5-9, конечно, не могут быть терпимы, ибо это означает короткое замыкание между рабочим проводом и землей (в данном случае «землей» является металлическая опора линии) со всеми проистекающими отсюда последствиями: выключением линии и перерывом в снабжении электроэнергией.

Почему ток «выбирает» себе путь по воздуху, а не по фарфору, из которого сделаны элементы гирлянды? Потому что электрическая прочность воздуха значительно меньше, чем прочность фарфора.

Мерой электрической прочности является то напряжение, при котором происходит пробой образцов определенной толщины.

Основным изолирующим материалом линий передачи является воздух, разделяющий провода друг от друга. Изоляторы — проходные и подвесные — нужны лишь там, где происходит сближение провода с опорами, со стенами зданий. Толщина изолирующего слоя воздуха, т. е. расстояние между проводами, должна находиться в соответствии

с рабочим напряжением линии. Это расстояние не может быть чрезмерно большим, так как оно без нужды усложнило бы конструкцию опор, сделав их слишком громоздкими. Оно не может быть слишком малым, так как в этом случае существовала бы опасность пробоя между проводами, т. е. короткого замыкания в линии.

Здесь возникает новое осложнение. Напряжение, приложенное к проводам, распределяется неравномерно по толщине изоляции. Это значит, что напряженность поля между двумя проводами неодинакова в различных точках. Наибольшего значения она достигнет на поверхности проводов, наименьшего—посредине между ними.

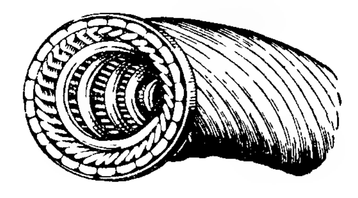


Рис. 7-16. Полый провод для очень высокого напряжения.

Может оказаться, что тех значений напряженности поля, которые мы имеем на поверхности проводов, будет достаточно, чтобы вызвать пробой воздуха, прочность же среднего слоя воздуха не нарушится.

На проводах образуется корона, т. е. видимое свечение воздуха вокруг проводов. Это свечение тем ярче, чем меньше радиус проводов и расстояние между ними. Прямой опасности для линии передачи здесь еще нет, так как средний слой воздуха справляется с задачей изоляции проводов. Но налицо дополнительные потери мощности в линии, налицо утечка тока.

Если мы не хотим допустить слишком больших потерь от короны, а допускать их невыгодно, мы должны увеличивать радиус провода или увеличивать расстояние между проводами. Увеличение радиуса провода не обязательно связано с излишним расходом металла. Провод может быть выполнен полым, как это показано на рис. 7-16. Возможность смятия такого провода предотвращается помещенной внутри него стальной пружиной.

Возможно и другое решение той же задачи. Вместо одного провода устанавливается несколько проводов меньшего сечения, соединенных параллельно. Так, каждый провод Куйбышевской линии «расщеплен» на три провода, которые расположены в вершинах равностороннего треугольника.

Но чем больше расстояние между проводами, тем больший магнитный поток пронизывает образуемый проводами

контур, тем больше индуктивность линии и ее индуктивное сопротивление. При нормальной работе линии это является только помехой. Изменение величины тока — сейчас речь идет о переменном токе — вызывает изменение запасенной в магнитном поле линии энергии. На генератор возлагается обязанность доставлять линии каждые полпериода полный запас необходимой ей магнитной энергии, а это уменьшает полезно передаваемую мощность. Было бы неправильным делать отсюда тот вывод, что индуктивность линии должна быть как можно меньше. Кроме нормального режима, возможны и аварийные, вроде возникновения коротких замыканий.

Громадные величины токов коротких замыканий, достигающие нескольких тысяч ампер, представляют собой большую угрозу для наших установок. Перегрев обмоток машин и аппаратов (вспомним закон Ленца — Джоуля), громадные механические усилия между проводниками, по которым проходит ток короткого замыкания, могут легко разрушить самую прочную конструкцию. Опасность должна быть предотвращена.

Индуктивность линий передачи является хотя и не всегда достаточным, но все же хорошим препятствием для токов короткого замыкания. Чем больше величина переменного магнитного потока, тем большее напряжение самоиндукции (э. д. с. самоиндукции) возникает в контуре, а следовательно, тем меньше ток. Поэтому уменьшать индуктивность линий имеет смысл лишь до известного предела.

Изоляция кабельной линии передачи. В кабельной линии передачи между жилами кабеля прокладываются изоляционные материалы с очень высокой электрической прочностью. Электрическая прочность этих материалов во много раз больше электрической прочности воздуха.

Применение такой изоляции позволяет уменьшить расстояние между проводами (жилами) и сделать линию передачи компактной. В настоящее время широко применяются кабели на напряжение до 35 *кв*. Кабельные линии передачи обычно укладывают в земле. Кабельной линии передачи не страшны грозы, ветер и гололед, поэтому они могут обеспечить бесперебойную подачу энергии.

В городах обычно удобнее применять кабельные линии передачи. При этом их длина сравнительно невелика. Стоимость таких линий передачи окупается удобством их эксплуатации.

Кабели снабжаются защитной оболочкой, предохраняющей их от повреждения и от порчи изоляции под действием влаги. Поэтому кабели прокладываются не только в земле, но и под водой.

Чаще всего в качестве изоляции применяют бумагу, пропитанную смесью масла и канифоли (в разогретом состоянии). В некоторых кабелях в качестве изоляции применяются пластмассы и резина.

В обычно применяемых кабелях каждая жила изолируется (обматывается) отдельно. Затем обматываются изоляцией вместе жилы кабеля (так называемая поясная изоляция). Пропитанный кабель покрывают свинцовой оболочкой.

Свинцовая оболочка вполне непроницаема для жидкостей и газов, но обладает малой механической прочностью. Поэтому обычно для защиты от механических повреждений кабель бронируют, т. е. покрывают стальными лентами или проволоками. На свинцовую оболочку предварительно наносят так называемую подушку из грубой кабельной пряжи (пенька или джут), которая создает мягкую прокладку между свинцом и броней, чтобы сама броня не могла повредить свинец.

Сталь ржавеет, поэтому броня должна быть защищена от воздействия воды и разъедающих химических веществ. Для этого поверх брони наносят второй слой кабельной пряжи, который затем пропитывают битумом. Битум — это или природное ископаемое, которое называют также асфальтом, или продукт перегонки нефти.

Для обеспечения гибкости кабеля жилы большого сечения выполняются из нескольких скрученных вместе медных проволок.

В кабелях на напряжения выше 20—35 *кв* каждую жилу покрывают свинцовой оболочкой.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ
ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК

8-1. ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА

Трехфазный ток — русское изобретение. Одним из замечательнейших изобретений в области электротехники является открытие в 1891 г. трехфазного тока. В этом году русский инженер М. О. Доливо-Добровольский впервые осуществил передачу энергии трехфазным током на рас-

стояние 175 *км*. Передаваемая мощность составляла более 220 *квт*. Современные линии передачи простираются на сотни и тысячи километров, передают мощности в сотни тысяч киловатт, но способ передачи тот же, что и первой установки Доливо-Добровольского.



Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862—1919 гг.).

Трехфазный генератор. Трехфазный генератор представляет собой как бы три генератора, объединенных в одном устройстве. Эти три генератора должны иметь одинаковую по величине э. д. с. и одинаковую частоту. Но э. д. с. каждого генератора должны разновременно достигать своих наибольших (амплитудных) значений. Принято говорить, что эти э. д. с. отличаются друг от друга по фазе.

На рис. 8-1 показан простейший генератор трехфазного тока. Три проволочные рамки вращаются в магнитном поле с одной и той же угловой скоростью. Для каждой из рамок могут быть дословно повторены рассуждения, приведенные в § 6-3. Очевидно, что во всех трех рамках будут наводиться одинаковые э. д. с.—ведь рамки совершенно одинаковы и вращаются с одинаковой скоростью в одном и том же магнитном поле.

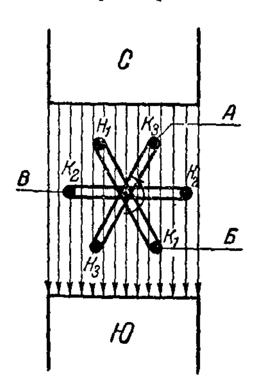


Рис. 8-1. Простейший генератор трехфазного тока — три проволочные рамки (*А*, *Б*, *В*) вращаются в магнитном поле с одинаковой скоростью.

Вместе с тем э. д. с. этих рамок не будут вполне тождественными. В тот момент, когда плоскость первой рамки расположена перпендикулярно к линиям магнитного поля, поток сквозь рамку является наибольшим. Но в тот же момент времени другие две рамки сцепляются с меньшими магнитными потоками, т. е. находятся в иных условиях. Можно сказать, что явления во второй рамке повторяют явления

в первой рамке, но с опозданием. Говорят, что э. д. с второй рамки **отстает от** э. д с. первой рамки. Величина этого отставания составляет одну треть периода, или 120°.

В трехфазном генераторе надо в определенном порядке соединить концы трех обмоток или рамок.

8-2. РАЗМЕТКА КОНЦОВ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ

Выбор направления тока. Рассмотрим следующую простую задачу. Две постоянные э. д. с. соединены последовательно и навстречу друг другу и требуется определить напряжение на свободных концах (рис. 2-37). Ответ дать нетрудно: искомое напряжение равно алгебраической сумме обеих э. д. с., а так как они соединены навстречу, то одну из них надо считать положительной и другую отрицательной, т. е. взять их разность. Однако разность может быть записана и как $Э_1—Э_2$ и как $Э_2—Э_1$, и неясно, как надо сделать выбор.

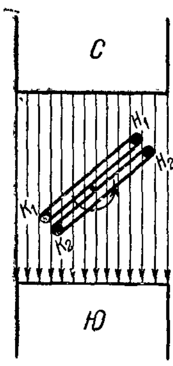


Рис. 8-2. Два одинаковых витка вращаются в магнитном поле. Если размечены выводы одного витка $Н_1$ (начало), $К_1$ (конец), то начало ($Н_2$) и конец ($К_2$) второго витка могут быть обозначены единственным указанным на рисунке способом.

Ответ дает рис. 2-37. Электродвижущая сила $Э_1—Э_2$ стремится посылать ток влево, т. е. в том же направлении, что $Э_1$, а э. д. с. $Э_2—Э_1$ стремится посылать ток в том же направлении, что $Э_2$, т. е. вправо. Поэтому прежде всего надо условиться о том, какое из направлений мы считаем положительным, и тогда знаки слагаемых э. д. с. получатся сами собой.

Сложение э. д. с. двух витков. Еще одна задача того же самого типа. Два одинаковых витка вращаются в однородном магнитном поле с одинаковой скоростью. Витки расположены так близко друг к другу (рис. 8-2), что сцепленные с ними магнитные потоки можно считать одинаковыми. Требуется определить напряжение, получающееся на свободных выводах этих витков, после того как они будут соединены последовательно.

Прежде всего надо разметить концы витков. Для одного витка эта операция выполняется совершенно произвольно. Оба вывода вполне равноправны, и обозначения *Н* (начало) *К* (конец) являются условными. Но разметка выво-

дов второго витка должна производиться с учетом уже выбранных обозначений. Витки расположены одинаково, и можно говорить о соответствии выводов. Показанные на чертеже обозначения начала H_2 и конца K_2 являются единственно возможными.

Последовательное соединение витков может быть выполнено двумя способами, а именно:

$$H_1 - K_1 - H_2 - K_2$$

и

$$H_1 - K_1 - K_2 - H_2.$$

На первом и последнем местах даны обозначения тех выводов, которые остаются свободными. На втором и третьем местах указаны выводы, соединенные друг с другом.

В первом случае напряжение на свободных выводах будет равно сумме э. д. с. обоих витков, т. е. удвоенному значению э. д. с. одного витка. Так как э. д. с. каждого витка изменяется по синусоиде, то удвоенное значение этой э. д. с. изобразится синусоидой с той же частотой, с той же начальной фазой, но с двойной амплитудой. Для доказательства достаточно сопоставить направление обхода с направлением магнитных линий. Для момента времени, соответствующего положению витков на чертеже, обход по пути $H_1—K_1—H_2—K_2$ связан с направлением магнитного потока правилом штопора. Это равносильно тому, что потоки, сцепленные с обоими витками, складываются. Такое соединение называется иногда согласным.

Иначе обстоит дело при соединении витков по схеме $H_1 — K_1 — K_2 — H_2$. При обходе по этому пути мы не будем охватывать магнитного потока. Если считать магнитный поток, сцепленный с первым витком, положительным, то второй виток будет сцеплен с отрицательным потоком той же величины. Полный магнитный поток в любой момент времени равен нулю. Нулю равна и наводимая в обоих витках э. д. с. Такое соединение называют встречным.

Таким образом, при соединении разноименных выводов витков или катушек мы будем получать на свободных выводах сумму э. д. с. отдельных витков, а при соединении одноименных концов — разность их э. д. с.

Сложение э. д. с. в трехфазном генераторе. Теперь мы подготовлены к решению более сложной задачи. Нам надо определить то напряжение, которое получится на свобод-

ных выводах какой-нибудь пары витков, показанных на рис. 8-1, при их последовательном соединении.

Разметим выводы первого витка, обозначив их по-прежнему через H_1 и K_1. Выбор этих обозначений, как мы уже знаем, вполне произволен.

Теперь нам надо решить трудный вопрос о разметке выводов второго витка. Трудность здесь в том, что витки

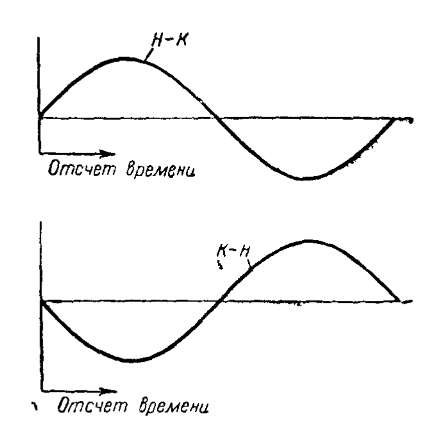


Рис. 8-3. Верхняя синусоида действует от конца к началу (*К — Н*), нижняя от начала к концу (*Н—К*). Начальные фазы синусоид *К — Н* и *Н — К* сдвинуты по фазе на 180°.

повернуты друг относительно друга на 120°. Для того чтобы совместить витки, можно повернуть второй виток на 60° в направлении, противоположном их вращению в магнитном поле, или же на 120° в направлении вращения. В зависимости от того, какой способ совмещения выберем мы и должны дать названия концам второго витка.

Рассуждаем так. Изменение обозначения выводов, т. е. переименование «конца» в «начало» и наоборот, равносильно изменению знака у э. д. с. Если э. д. с., действующая от начала к концу, изображается синусоидой *Н—К* (рис. 8-3), то от конца к началу действует э. д. с. *К—Н*, равная предыдущей по величине и противоположная ей по знаку. Синусоиды *Н—К* и *К—Н* имеют одинако-

вые амплитуды, одинаковую частоту, но их начальные фазы отличаются друг от друга на 180°.

Если вывод K_2 мы назовем началом, то э. д. с. второго витка будет опережать э. д. с. первого на 60°. Если же началом будет назван вывод H_2, то э. д. с. второго витка будет отставать от э. д. с. первого на 120°. Ясно, что одно решение отличается от другого изменением начальной фазы на 120°+60°=180°, т. е. изменением знака, и результат в обоих случаях будет одинаковый.

Останавливаемся на втором решении, т. е. называем вывод H_2 началом. В этом случае угловые расстояния между началами всех трех витков будут одинаковыми и равными одной трети окружности ротора, т. е. 120°. Начальные фазы э. д. с. обмоток отличаются друг от друга на одну треть периода, т. е. опять на 120°.

Фазы генератора. Генераторные обмотки трехфазной системы принято кратко обозначать «фазами». Таким образом, в электротехнике слово фаза применяется в двух различных смыслах: как понятие, характеризующее стадию периодического процесса, и как наименование составной части трехфазной машины или линии передачи. Не следует этого забывать.

8-3. СЛОЖЕНИЕ ФАЗНЫХ Э. Д. С.

Пусть две обмотки трехфазного генератора соединены по схеме H_1—K_1—H_2—K_2. Напряжение на свободных концах будет равно сумме э. д. с. обеих обмоток. Эту сумму можно найти различными способами.

Нарисуем на одной диаграмме обе фазные э. д. с. и найдем их сумму для любого момента времени. Построение удобно производить на клетчатой или, еще лучше, на миллиметровой бумаге.

Строим горизонтальную ось такой длины, чтобы на ней уместился один период переменного тока. Продолжительность периода изобразим (рис. 8-4) отрезком в 24 клетки. Амплитуду фазного напряжения изобразим в 10 клеток, так что одна клетка будет соответствовать 10% амплитуды.

Значения, которые приобретает э. д. с. первой фазы через каждую $^1/_{24}$ часть периода (т. е. через промежуток времени, изображаемый одной клеткой), берем из таблицы на стр. 232 и по ним строим первую синусоиду. Вторую

синусоиду строим по данным той же таблицы, но построение начинаем, пропустив первые восемь клеток, т. е. одну треть периода, так что 17-й клеткой будет первая. Кривая изображающая сумму обеих э. д. с., изображена на той же диаграмме.

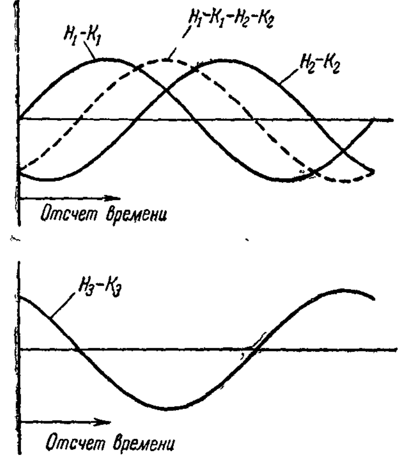


Рис. 8-4. Разбиваем период на 24 части и строим синусоиды напряжения $H_1 - K_1$, $H_2 - K_2$ и их сумму. Ниже показана синусоида $H_3 - K_3$.

Наше построение равносильно такому расчету. Перепишем таблицу на стр. 232 и дополним ее еще тремя столбцами.

Во втором столбце даны мгновенные значения э. д. с. второй фазы. В сущности это повторение первого столбца, но числа второго столбца перенесены на восемь строк вниз. Так и должно быть: восемь строк соответствуют одной трети периода, а это и есть фазный сдвиг между первой и второй фазами.

Третий столбец содержит суммы второго и третьего столбцов. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что здесь повторяются те же самые числа, но в каком-то другом порядке. Дело разъясняется четвертым столбцом, где даны значения

	Э. д. с. *1*	Э. д. с. *2*	Сумма	Э. д. с. *3*
0	0	—86,6	—86,6	86,6
1	25,9	—96,6	—70,7	70,7
2	50,0	—100,0	—50,0	50,0
3	70,7	—96,6	—25,9	25,9
4	86,6	—86,6	0	0
5	96,6	—70,7	25,9	—25,9
6	100	—50,0	50,0	—50,0
7	96,6	—25,9	70,7	—70,7
8	86,6	0	86,6	—86,6
9	70,7	25,9	96,6	—96,6
10	50,0	50,0	100	—100
11	25,9	70,7	96,6	—96,6
12	0	86,6	86,6	—86,6

э. д. с. третьей фазы. Это все тот же второй столбец, но его числа перенесены на восемь строк вверх.

Оказывается, что сумма э. д. с. первой и второй фаз равна э. д. с. третьей фазы, но с обратным знаком. Отсюда следует исключительно важный результат:

Сумма мгновенных значений э. д. с. трех фаз трехфазной системы равна нулю в любой момент времени.

При этом предполагается, что трехфазная система симметрична, т. е. амплитуды всех трех э. д. с. одинаковы, и фазные углы отличаются на 120°.

Напряжение между свободными концами двух фаз генератора. Теперь найдем напряжение на свободных концах обмоток, соединенных по схеме $H_1—K_1—K_2—H_2$. В этом случае надо взять разность второго и третьего столбцов таблицы на стр. 284. Для этой разности получаются такие величины:

	Разность между э. д. с. 1 и э. д. с. 2
0	86,6
1	122,5
2	150,0
3	167,3
4	173,2
5	167,3
6	150,0
7	122,5
8	86,6
9	44,8
10	0
11	—44,8
12	—86,6

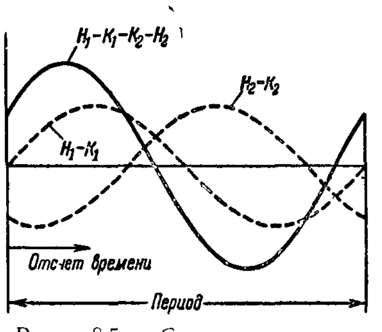


Рис. 8-5. Строим синусоиды $H_1 — K_1$ и $H_2 — K_2$. Их разность соответствует синусоиде $H_1 — K_1 — K_2 — H_2$.

Соответствующее построение выполнено на рис. 8-5.

Мы получили синусоиду, опережающую э. д. с. первой фазы на две клетки, т. на $^1/_{12}$ долю периода (30°). Амплитуда этой синусоиды в 1,732 раза больше амплитуды фазной э. д. с. Число 1,732 имеет важную особенность. Если его умножить на самого себя, в ответе получится 3. Это так называемый корень квадратный из трех: $\sqrt{3} = 1{,}732$.

8-4. СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕЗДОЙ

Соединим в одну точку три одноименных конца генераторных обмоток (рис. 8-6). Такое соединение называется соединением в звезду с нулевым проводом.

Линейные и нулевой провода. В нашем распоряжении имеется четыре зажима — K, H_1, H_2, H_3. Точка K называется нейтралью или нулем, а отходящий от нее провод — нейтральным или нулевым. Зажимы H_1, H_2 и H_3 называются линейными. Линейными называются и провода, отходящие от этих зажимов.

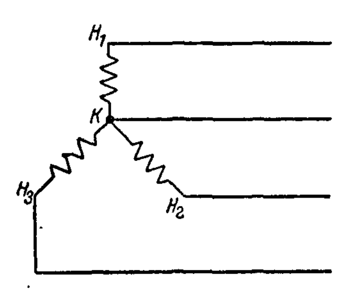


Рис. 8-6. Соединение обмоток в звезду с нулевым проводом. Точка K называется нейтральной или нулем, а отходящий от нее провод — нейтральным или нулевым.

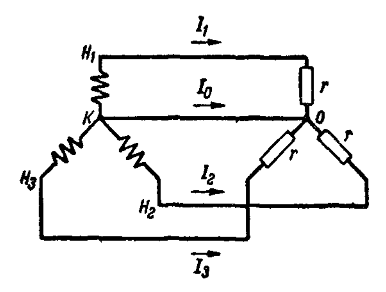


Рис. 8-7. Между нулевым проводом и линейными проводами включены одинаковые сопротивления. Нагрузка в таком случае равномерная—токи в сопротивлениях равны, тока в нулевом проводе не будет.

Напряжение между нулем и линейными зажимами равно фазной э. д. с. Это напряжение называется фазным.

Напряжение между любой парой линейных зажимов называется линейным. Его амплитудное значение в $\sqrt{3}$ раза больше амплитуды фазного напряжения. В таком же отношении находятся действующие значения линейного и фазного напряжений.

Холостой ход генератора. На схеме рис. 8-6 нет ни одного замкнутого контура и, следовательно, в ней не может протекать ток. Это так называемый холостой ход генератора.

Равномерная нагрузка фаз. Если включить одинаковые сопротивления между нулевым и линейными проводами (рис. 8-7), то через каждое из них будут протекать токи одинаковой величины. В цепи нет реактивных элементов — индуктивных катушек и конденсаторов — и, следовательно,

синусоиды токов будут иметь те же начальные фазы, что и фазные напряжения. Иными словами, токи будут совпадать по фазе с соответствующими напряжениями.

Итак, три синусоиды токов будут иметь одинаковые амплитуды, а их фазные углы будут отличаться друг от друга на $^1/_3$ периода. Мы видели, что в любой момент времени сумма трех таких синусоид равна нулю.

Но сумма трех токов, протекающих в трех нагрузочных сопротивлениях, равна току в нулевом проводе. Если сумма трех фазных токов равна нулю, то тока в нулевом проводе не будет.

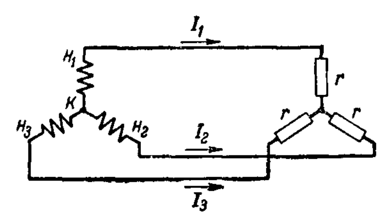


Рис. 8-8. Трехфазная система без нулевого провода.

Если нагрузка будет содержать реактивные элементы, но будет одинакова во всех трех фазах, то каждый из токов будет сдвинут относительно своего фазного напряжения на один и тот же угол. Три синусоиды токов будут иметь одинаковые амплитуды при разнице начальных фаз в 120° и, следовательно, их сумма будет равна нулю.

При равномерной нагрузке фаз нулевой провод оказывается лишним; его можно не прокладывать и перейти к передаче тока по трем проводам, как показано на рис. 8-8.

Передача энергии по трем проводам. Здесь много общего с трехпроводной системой постоянного тока, где при равенстве нагрузок ток в среднем проводе равнялся нулю.

При этом, конечно, в каждое данное мгновение ток по одному или двум проводам течет от генераторов к потребителю, а по двум другим или по одному течет обратно от потребителя к генератору, причем ток от генератора течет то по первому, то по второму проводу и соответственно каждый из них по очереди служит для обратного пути тока.

На практике обычно передача тока производится по трем проводам, однако в тех случаях, когда нужно располагать двумя различными напряжениями (фазным и линейным) или когда нагрузка потребителей в трех фазах очень неравномерна, прибегают и к четырехпроводной системе, т. е. пользуются четвертым проводом, идущим от средней точки генератора, которая называется также нейтральной точкой.

8-5. СОЕДИНЕНИЕ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Кроме соединения звездой, может применяться еще и соединение в треугольник (рис. 8-9).

В этом случае конец предыдущей фазной обмотки соединяется с началом последующей фазной обмотки, т. е. K_1 с H_2, K_2 с H_3 и K_3 с H_1.

При отсутствии нагрузки, например как в схеме рис. 8-9, тока в генераторной обмотке не будет, потому что сумма всех трех фазных напряжений в каждое данное мгновение равна нулю: две обмотки стремятся послать ток в одну сторону, а третья им противодействует, причем роль разных обмоток все время меняется.

При соединении генератора в треугольник напряжение между проводами, связывающими его с потребителем, т. е. линейное напряжение, будет равно напряжению соответствующей фазы генератора. Из схемы рис. 8-9 становится ясным, что действительно здесь линейное напряжение является в то же время фазным, т. е. фазные напряжения, очевидно, будут равны линейным.

Неверное соединение обмоток генератора. Допустим, что соединение обмоток генератора в треугольник выполнено неверно: пусть, например, конец обмотки второй фазы соединен с концом обмотки первой фазы, начало второй фазы — с началом третьей, а конец третьей, как полагается,— с началом первой. Что произойдет в таком случае?—Внутри такого треугольника будет протекать очень большой ток короткого замыкания, который приведет к аварии. Действительно, сопротивление генераторных обмоток очень невелико, они образуют замкнутую цепь, а в этой цепи действует сумма э. д. с. первой обмотки, э. д. с. третьей обмотки и взятой с обратным знаком э. д. с. второй обмотки (так как она включена теперь навстречу двум другим обмоткам). Но эта сумма теперь уже не будет равна нулю в любой момент времени. Так соединять обмотки генератора, разумеется, нельзя.

Соединение нагрузки треугольником. Подобно обмоткам генератора нагрузку в трехфазной системе можно соединять не только в звезду, но и в треугольник.

На рис. 8-10 показано такое соединение потребителя в треугольник. Генератор на изображенной схеме соединен в звезду.

В этом случае потребитель оказывается включенным не на фазное, а на линейное (или междуфазное) напряжение.

Напряжение у потребителя теперь в 1,732 раза больше фазного напряжения генератора.

Когда мы имели дело с соединением в звезду, фазные токи были равны токам в проводах линий, т. е. линейным токам. Действительно, ток, протекающий из линии к лю-

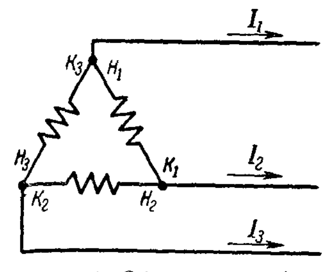


Рис. 8-9. Обмотки трехфазного генератора соединены в треугольник.

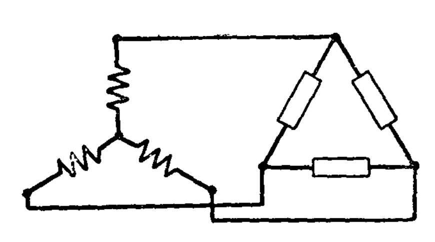


Рис. 8-10. Генератор соединен в звезду, потребитель — в треугольник.

бому из зажимов треугольника, здесь разветвляется на два тока, текущих по двум сторонам треугольника, примыкающим к данному зажиму.

Ток в проводах линии — линейный ток — в 1,732 раза больше тока в сторонах треугольника (фазного тока). В том, что это действительно так, мы легко убедимся, подсчитав мощность трехфазного тока.

8-6. МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Начнем со схемы, изображенной на рис. 8-10. В этом случае мы пренебрежем сопротивлением соединительных проводов и примем, что мощность, отдаваемая генератором, равна мощности, получаемой потребителем. Кроме того, предположим, что сопротивление потребителя — чисто активное.

Мощность, отдаваемая каждой из фаз генератора, равна фазному напряжению, умноженному на фазный ток генератора и на соответствующий $\cos\varphi$, в данном случае равный единице (так как нагрузка чисто активная). Общая мощность генератора будет, очевидно, в 3 раза больше:

$$3 \times \textit{фазное напряжение} \times \textit{фазный ток}. \qquad \text{(A)}$$

В данном случае, однако, фазный ток равен линейному току, а фазное напряжение равно линейному напряжению, деленному на 1,732.

Значит, общая мощность будет равна:

$\frac{3}{1,732}\times$ *линейное напряжение*$\times$*линейный ток.*

Но 3, деленное на 1,732, опять равно 1,732:

$$\frac{3}{1,732}=1,732$$

и, следовательно, общая мощность P равна произведению из линейного тока I на линейное напряжение U, умноженному еще на $1,732=\sqrt{3}$:

$$P=\sqrt{3}UI.$$

В том случае, когда фазный ток и фазное напряжение отстают друг от друга (из-за наличия в цепи индуктивности или емкости), в выражение мощности должен входить соответствующий $\cos\varphi$. Выражение мощности трехфазного тока при равномерной нагрузке в этом случае может быть записано так:

$$P=\sqrt{3}UI\cos\varphi.$$

Теперь подойдем к определению мощности с другой стороны. Начнем определять мощность потребителя, соединенного в треугольник. Она равна:

$3\times$*линейное напряжение*$\times$*фазный ток в сторонах треугольника.* (Б)

Сопоставляя выражение (Б) с выражением (А) и имея в виду, что оба они выражают одну и ту же мощность, мы легко найдем, что фазный ток в сторонах треугольника действительно должен быть в 1,732 раза меньше тока линейного.

8-7. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ

Сравнение потерь в однофазной и трехфазной линиях при одинаковом токе. В то время как потеря мощности в проводах однофазной линии передачи равна:

$2\times$*ток*$\times$*ток*$\times$*сопротивление каждого из проводов линии,*

в трехфазной трехпроводной линии передачи потеря мощности будет в 1,5 раза больше, если ток в проводах будет тем же самым и если неизменным остается сечение провода.

Действительно, потеря мощности для такой трехфазной равномерно нагруженной линии, очевидно, будет равна: *3×ток×ток×сопротивление каждого из проводов линии,* так как в каждом из проводов потеря мощности будет определяться законом Ленца — Джоуля.

Однако при трехфазном токе общая передаваемая мощность будет в 1,732 раза больше, если напряжения между проводами и токи в проводах в случае однофазной и трехфазной линий будут одинаковы.

Сравнение потерь в однофазной и трехфазной линиях при одинаковой передаваемой мощности. Если же, не изменяя напряжения, довести мощность однофазной линии до мощности трехфазной линии, то ток в однофазной линии должен быть увеличен в 1,732 раза.

Потери в проводах при этом возрастут [формула (Б)] в 1,732 · 1,732=3 раза, т. е. будут в 2 раза больше потерь в трехфазной линии.

Пример. Определить потерю мощности в медных проводах, имеющих сечение 4 *мм²*, по которым на расстояние в 100 *м* (длина линии) передается энергия, необходимая для питания трех 500-ваттных ламп при напряжении на лампах по 120 *в*.

Предположим сначала, что энергия передается однофазным переменным током (рис. 8-11).

Общая мощность ламп $P = 3 \cdot 500$ *вт* $= 1\,500$ *вт*; напряжение

$$U = 120 \text{ в};$$

следовательно, ток, идущий по проводам, будет равен:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1\,500 \text{ вт}}{120 \text{ в}} = 12,5 \text{ а}.$$

Сопротивление каждого из проводов определим по формуле

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{100}{56 \cdot 4} = 0,445 \text{ ом}$$

$\left(\text{полагая удельное сопротивление } \rho = \frac{1}{56}\right)$.

Мощность, теряемая в проводах, при этом будет равна:

$$P = 2 \cdot I \cdot I \cdot r = 2 \cdot 12,5 \cdot 12,5 \cdot 0,445 = 139 \text{ вт}.$$

Предположим теперь, что согласно схеме, представленной на рис. 8-12, передача энергии к тем же трем лампам производится трехфазным током по трехпроводной линии при помощи проводов того же сечения.

В этом случае мощность P, ток I (линейный) и напряжение U (линейное, равное напряжению на лампах), будут связаны уравнением

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I.$$

Следовательно, при той же мощности $P = 1\,500$ *вт* и при том же напряжении $U = 120$ *в* находим, что ток будет равен:

$$I = \frac{P}{1{,}732 \cdot U} = \frac{1\,500}{1{,}732 \cdot 120} = 7{,}22 \ a.$$

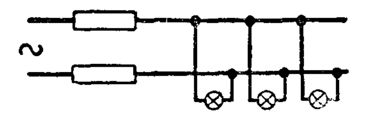


Рис. 8-11. Однофазная передача энергии к трем лампам.

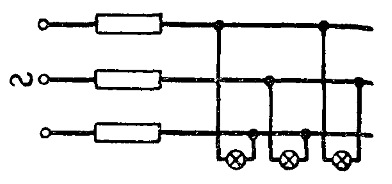


Рис. 8-12. Трехфазная передача.

Следует обратить внимание, что здесь нагрузка соединена треугольником.

Сопротивление проводов нам известно: для каждого провода $r = 0{,}445$ *ом*. А так как потеря мощности теперь происходит в трех проводах, то находим, что общая потеря мощности составляет:

$$P = 3 \cdot I \cdot I \cdot r = 3 \cdot 7{,}22 \cdot 7{,}22 \cdot 0{,}445 = 69{,}5 \ вт.$$

Таким образом, при передаче трехфазным током потеря мощности будет в 2 раза меньше, чем при передаче однофазным током.

Сравнение потерь при одинаковой затрате меди. При трехфазном токе мы затратили в 1,5 раза больше меди (три провода по 4 *мм*^{2}), чем при передаче однофазным током (всего два провода по 4 *мм*^{2}). Но можно убедиться в том, что даже при одинаковой затрате меди потери в трехфазной линии будут меньше. Для этого рассмотрим такой пример.

Пример. Мы имеем те же условия передачи, что и в предыдущем примере, за исключением того, что при передаче однофазным током сечение проводов равно 6 *мм*^{2}, а при передаче трехфазным током 4 *мм*^{2}. Таким образом, количество меди в обоих случаях одинаково ($2 \cdot 6$ *мм*$^2 = 3 \cdot 4$ *мм*^{2}).

Определим опять мощность, теряемую в проводах.

В случае трехфазного тока мы имеем в точности прежние условия, значит, теряемая мощность по-прежнему равна:

$$P = 69{,}5 \ вт.$$

В случае же однофазного тока сечение проводов увеличено в 1,5 раза. Это значит, что сопротивление проводов уменьшилось также в 1,5 раза. А это в свою очередь значит, что потеря мощности стала ровно в 1,5 раза меньше, т. е. она будет уже не 139 *вт*, а

$$\frac{139}{1{,}5} = 92{,}5 \ вт.$$

Потеря мощности и в этом случае больше при однофазной передаче.

Преимущества трехфазных систем. Из рассмотренных примеров достаточно отчетливо видим преимущества трехфазного тока. Но самым существенным достоинством трехфазных систем является их удобство для устройства электрических двигателей (асинхронный трехфазный двигатель является самым простым из всех видов электрических двигателей, § 12-7).

8-8. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Четырехпроводная система. Если передача энергии производится по четырем проводам, то для измерения мощности трехфазного тока необходимо иметь три ваттметра (рис. 8-13). К каждому ваттметру будет приложено фазное напряжение и через него будет проходить фазный ток, т. е. он будет учитывать мощность одной фазы. Сумма показаний этих ваттметров даст мощность трехфазной системы.

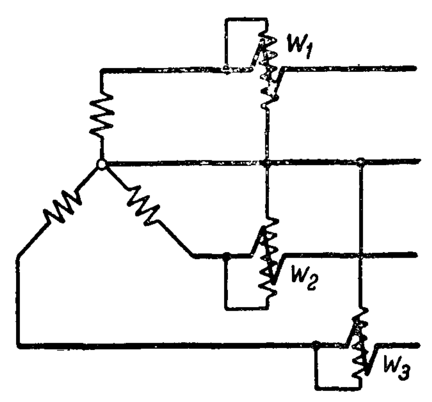


Рис. 8-13. Измерение мощности в трехфазной системе с нулевым проводом. Мощность нагрузки равна сумме показаний трех ваттметров W_1, W_2 и W_3.

Если нагрузка фаз равномерна, то показания всех ваттметров будут одинаковыми, и можно обойтись одним ваттметром. Очевидно, что в этом случае показания ваттметра надо утроить.

Трехпроводная система. Если же передача энергии производится по трем проводам, то для измерения мощности необходимо иметь всего два ваттметра, включенных так, как показано на рис. 8-14. Сумма показаний этих ваттметров дает мощность трехфазной системы.

Чтобы убедиться в этом, вспомним, что третий провод трехфазной системы всегда является обратным для первых двух. Иными словами, трехфазная линия ведет себя совершенно так же, как показанные на рис. 8-15 две однофазные линии. Очевидно, что можно измерить мощность этих двух линий, если включить ваттметры, как показано на рис. 8-15.

Но в чем разница между схемами рис. 8-14 и 8-15? Только в том, что в схеме рис. 8-15 мы расщепили третий провод, и ничего не изменится, если мы объединим эти

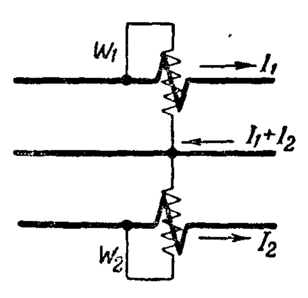


Рис. 8-14. Мощность трехфазной системы без нулевого провода может быть измерена двумя ваттметрами W_1 и W_2, сумма показаний которых равна мощности нагрузки.

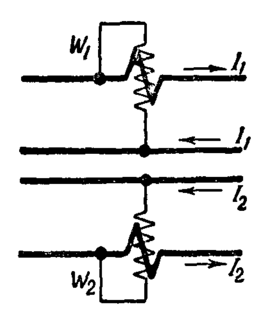


Рис. 8-15. Обоснование способа измерения мощности, показанного на рис. 8-14.

два провода в один, заставив протекать по нему сумму токов I_1 и I_2.

На практике эти два ваттметра имеют обычно один циферблат и одну стрелку. На эту стрелку действуют одновременно усилия подвижных катушек обоих ваттметров и стрелка показывает сумму мощностей, учитываемых прибором.

8-9. РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

В § 5-11 на примере кенотрона и электронной лампы с сеткой мы видели, что для протекания тока в разреженном газе нужно было раскалить катод. После того как катод накалился, он стал служить мощным источником электронов.

Эти электроны под действием приложенного внешнего напряжения перемещаются ко второму электроду, и в цепи может проходить ток. Но такое движение электричества возможно только тогда, когда к раскаленному катоду подводится отрицательное напряжение, а к другому (холодному) электроду — положительное.

В противоположном направлении ток идти не может, так как холодный электрод не может явиться мощным источником электронов. Такое устройство, как электронная лампа или кенотрон, может служить для выпрямления

переменного тока: прикладывая к кенотрону переменное напряжение, мы будем получать в его цепи ток постоянного направления.

Подобно кенотрону устроены и ртутные выпрямители трехфазного тока.

Устройство ртутного выпрямителя. Представим себе сосуд, из которого откачан воздух, на дно налита ртуть, а с боков введены три стальных или графитных стержня (электроды). При этом наружу выведены провода, соединяющиеся или с ртутью (один из проводов), или с каким-либо из электродов (еще три провода). Корпусы ртутных

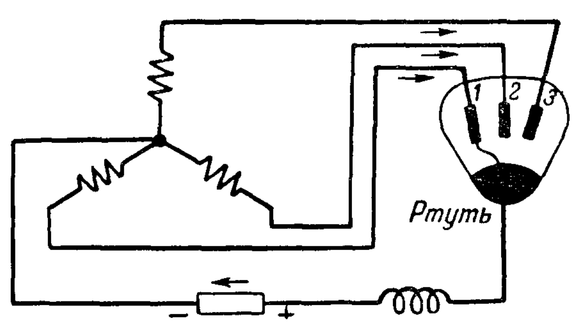


Рис. 8-16. Схема трехфазного ртутного выпрямителя.

выпрямителей делаются стеклянными или стальными; при этом, разумеется, электроды от металла изолируются.

Соединим через сопротивление нагрузки нулевой провод трехфазной системы с проводом, идущим к ртути, а три фазных провода соединим с тремя другими электродами, как это показано на рис. 8-16.

Работа ртутного выпрямителя. Пользуясь каким-либо вспомогательным источником напряжения, создадим теперь разряд между ртутью и дополнительным электродом (на рис. 8-16 это зажигающее устройство не показано). Электроны будут направляться к тому из трех электродов *1*, *2*, *3*, напряжение на котором в данный момент выше.

Пусть, например, в рассматриваемый момент времени самым высоким положительным напряжением обладает электрод *1*. Электроны, быстро движущиеся к этому электроду, ионизируют пары ртути. Все электроны — отрицательные заряды—движутся к электроду *1*. Между электродом *1* и ртутью, таким образом, устанавливается дуговой разряд.

Но через некоторый промежуток времени напряжен на электроде *1* уменьшается, зато увеличивается поло- тельное напряжение на электроде *2*. Тогда дуга перебр сывается на этот электрод. Через некоторое время ду перебросится на электрод *3*. Так, один конец дуги пер брасывается с электрода на электрод. Отрицательны конец дуги при этом все время остается на катодном пя не, которое может перемещаться по ртутной поверхност

Что же в итоге мы получаем? Ток во всех фазных пр водах будет проходить только в направлении от генерат ра к ртутному выпрямителю. При этом ток идет то первому, то по второму, то по третьему проводу. В нул вом же проводе ток течет непрерывно в одном и том ж направлении от выпрямителя к генератору[1].

На рис. 8-16 в нулевом проводе показаны последова тельно включенные сопротивления и индуктивность.

Сопротивление изображает потребителя, получающег выпрямленный ток. Что касается индуктивности, она вклю чается для того, чтобы сглаживать колебания величин тока.

Применение ртутных выпрямителей. Аналогично устраи ваются ртутные выпрямители и для однофазного пере менного тока. Однако выпрямители трехфазного тока ра ботают лучше.

В настоящее время ртутные выпрямители могут строиться для очень больших мощностей.

Ртутные выпрямители могут применяться на установ ках как низкого, так и высокого напряжения (около 10 тыс. *в*) и могут строиться на достаточно большие мощ ности.

Однако современная электротехника ставит ряд задач которые не могут быть разрешены установкой ртутных выпрямителей. К числу таких задач относятся, с одно стороны, выпрямление малых токов различных напряже ний, а с другой стороны, устройство выпрямительных уста новок с небольшими напряжениями; в обоих случаях при менение ртутных выпрямителей слишком громоздко. В ка честве малых выпрямительных установок большое приме нение находят селеновые выпрямители, а для малых токов используются кенотроны, которые могут изготовляться на очень высокие напряжения.

---

[1] Вспомним, что направление движения электронов противополож но направлению тока (§ 5-2).

Раньше мы видели, что потребитель может получать электрическую энергию в виде постоянного тока и в виде переменного тока; напряжение при этом может иметь различное значение. Теперь мы видим, что можно из переменного тока получать постоянный. Оказывается, что можно решить и обратную задачу. Об этом речь будет в следующей главе.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

9-1. АНОДНО-СЕТОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УПРАВЛЯЕМОЙ ЛАМПЫ

В § 5-20 было описано устройство простейшей управляемой электронной лампы. Лампа имеет три электрода: катод, анод и управляющую сетку—и называется триодом.

Схемы с электронными лампами содержат много элементов и часто бывают сложны. Чтобы научиться разбираться в таких схемах, научиться, как говорят, «читать схемы», надо знать некоторые условные обозначения На сложных схемах часто не показывают вспомогательные элементы. В этом случае заканчивают стрелкой проводник, подключаемый к непоказанному устройству. Сравните рис. 9-1 с рис. 5-27. Чтобы не загромождать схему, на рис. 9-1 не показано включение вспомогательной батареи накала и сеточной цепи.

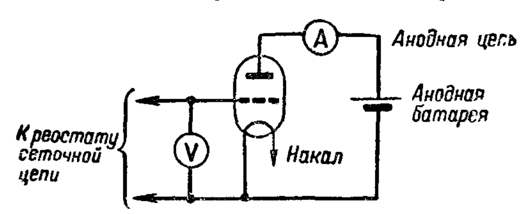


Рис. 9-1. Схема включения трехэлектродной лампы.

При анализе работы управляемых электронных ламп обычно измеряют напряжение между электродом лампы и катодом, и его часто называют электродным напряжением. Например, говорят: «напряжение на сетке». Надо понимать: напряжение между сеткой и катодом.

Управление анодным током осуществляется путем изменения сеточного напряжения. Чем еще определяется величина тока в анодной цепи? Она зависит от напряжения между катодом и анодом (т. е., как мы условились говорить, от анодного напряжения). Она зависит также от конструкции лампы. Если взять две лампы и подать одинаковые напряжения на сетки и аноды этих ламп, то еще не значит, что ток в этих лампах будет одинаковым. Ток будет бо́льшим в той лампе, в которой более мощный катод, т. е катод, испускающий большее число электронов (гл. 5).



Рис. 9-2. Анодно-сеточная характеристика трехэлектродной лампы.

Пунктиром показаны соответствующие анодно-сеточные характеристики при напряжениях на аноде лампы соответственно 75, 150, 200 *в*.

Чтобы характеризовать работу лампы, часто пользуются анодно-сеточной характеристикой (рис. 9-2), которая показывает, как зависит анодный ток от напряжения на сетке лампы. По горизонтальной оси отложено напряжение на сетке, по вертикальной оси — анодный ток.

Для получения сеточной характеристики включают лампу в схему (рис. 9-3).

Опишем, как строится сеточная характеристика выбранного триода. Пусть напряжение анодной батареи 100 *в*, а напряжение вспомогательной батареи, включенной в цепь сетки, 3 *в*. Вспомогательная батарея подключена минусом к сетке. Значит, напряжение на сетке отрицательное. Установим ползунок реостата в верхнем положении (рис. 9-3,*а*). При этом к сетке подводится полное напряжение батареи, равное 3 *в*. Несмотря на наличие анодной батареи, ток

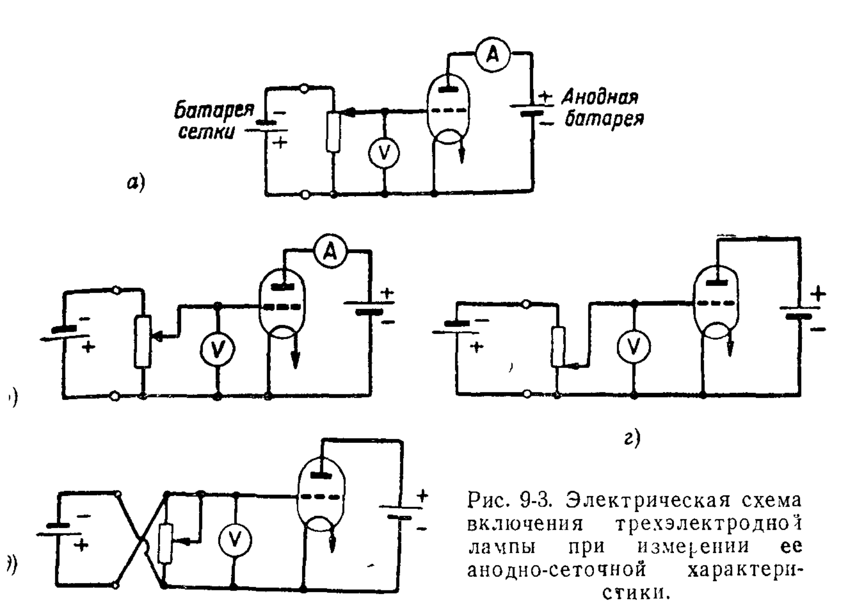


Рис. 9-3. Электрическая схема включения трехэлектродной лампы при измерении ее анодно-сеточной характеристики.

Анодный ток измеряется амперметром *A*. Анодное напряжение, равное напряжению анодной батареи, выбрано равным 100 *в*. Для измерения сеточного напряжения служит вольтметр *V* Сеточное напряжение изменяется с помощью ползункового реостата; в положении реостата, соответствующем рис 9-3, *а*, между сеткой и катодом прикладывается (минусом к сетке) полное напряжение батареи сетки. При этом схема заперта—анодный ток через лампу не проходит. На рис. 9-2 этому режиму лампы соответствует точка *а*. При перемещении движка реостата вниз сеточное напряжение уменьшается: между катодом и сеткой включается напряжение, соответствующее лишь определенной части напряжения батареи. Соответствующие положениям рис. 9-3, *б*, *г* и *д* режимы ламп показаны соответствующими точками на графике рис. 9-2.

в анодной цепи не идет: «лампа заперта сеточным напряжением». (Точка *а* на графике рис. 9-2).

Начинаем переводить ползунок реостата вниз (рис. 9-3,*б*). Теперь к сетке прикладывается меньшее отрицательное напряжение.

При напряжении на сетке — 2 *в* лампа «отпирается» и амперметр показывает ток, проходящий в анодной цепи. Зафиксируем это напряжение и нанесем его на графике рис. 9-2 (точка *б*). Так же наносим на графике следующие точки. При сеточном напряжении — 1 *в* ток анодной цепи нашей лампы составляет 7 *ма* (точка *в*). При выведенном реостате, как показано на рис. 9-3,*г*, напряжение на сетке равно нулю и ток 20 *ма* (точка *г* графика рис. 9-2). Наконец, после переключения зажимов вспомогательной батареи плюсом к сетке, определяем участок сеточной характеристики и при положительных сеточных напряжениях

(рис. 9-3,*д*). При сеточном напряжении + 1 *в* ток нашей лампы равен 40 *ма* и мы получаем точку *д* графика.

Обычная анодно-сеточная характеристика триода показана на рис. 9-2. Анодно-сеточные характеристики определяются для нескольких анодных напряжений и строятся на одном графике.

9-2. УСИЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема для усиления переменного тока почти ничем не отличается от разобранных схем. Усиливаемый ток пропускается через сопротивление, включаемое между сеткой и катодом (рис. 9-4). Это сопротивление называют сеточным сопротивлением. Проходя по сеточному сопротивлению, усиливаемый ток создает на нем синусоидальное напряжение, которое и управляет током лампы. С синусоидальной формой переменного тока и напряжения мы знакомились в § 6-5. Точно так же, как мы строили э. д. с. си-

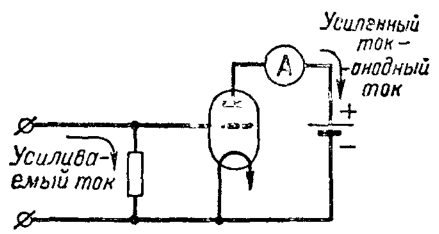


Рис. 9-4. Схема простейшего лампового усилителя тока.

нусоидальной формы, построим синусоидальное сеточное напряжение, создаваемое усиливаемым током. Для удобства будем проводить все построения на том же графике, где нанесена сеточная характеристика лампы (рис. 9-5). Величину сеточного напряжения будем поэтому откладывать вдоль горизонтальной оси, как это сделано для графика сеточной характеристики, а отсчет времени будем производить вдоль вертикальной оси вниз (ср. с рис. 6-4).

Изменение анодного тока будем отмечать на графике, который расположим рядом на одном уровне с сеточной характеристикой справа от нее. При таком расположении особенно просто определяется величина анодного тока. Например, для времени, равного одной восьмой доле периода (по вертикальной оси отсчета времени) определяем сеточное напряжение. Оно показано стрелкой. Сносим это напря-

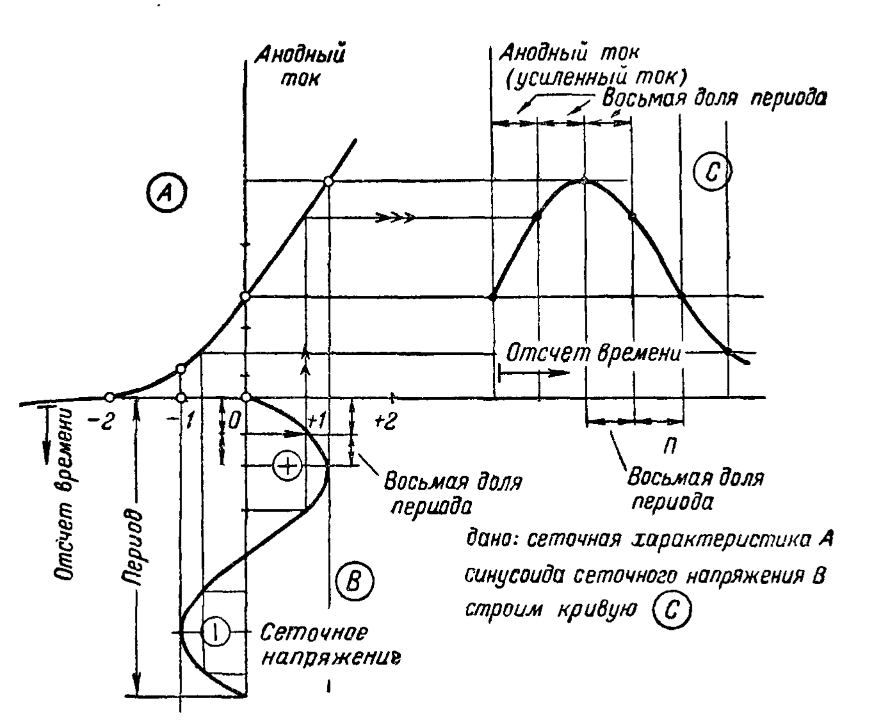


Рис. 9-5. Построение анодного тока в схеме лампового усилителя тока с помощью анодно-сеточной характеристики (*A*). Усиливаемый переменный сеточный ток задается с помощью графика (*B*). График анодного тока (*C*) строится по точкам.

жение на график анодно-сеточной характеристики (две стрелки). Полученное значение тока сносим (три стрелки) на вертикаль, соответствующую одной восьмой периода графика анодного тока. Для уяснения рекомендуем читателю все построения повторно проделать самому.

9-3. РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ

Анодно-сеточная характеристика электронной лампы нелинейна. Ее крутизна изменяется с ростом сеточного напряжения. Эта нелинейность характеристики электронной лампы позволяет производить регулировку усилителя. Для того чтобы разобраться в этом, проделаем следующий опыт. В схеме усилителя включим между сеткой и катодом дополнительную батарею (рис. 9-6). Напряжение дополнительной батареи называют сеточным смещением. Если

теперь по сеточному сопротивлению пропускать усиливаемый ток, то выделяемое в сопротивлении напряжение складывается с напряжением сеточного смещения в общее сеточное напряжение. Это суммарное сеточное напряжение, отличается от синусоидального на постоянное слагаемое, равное сеточному смещению. Если бы мы захотели теперь

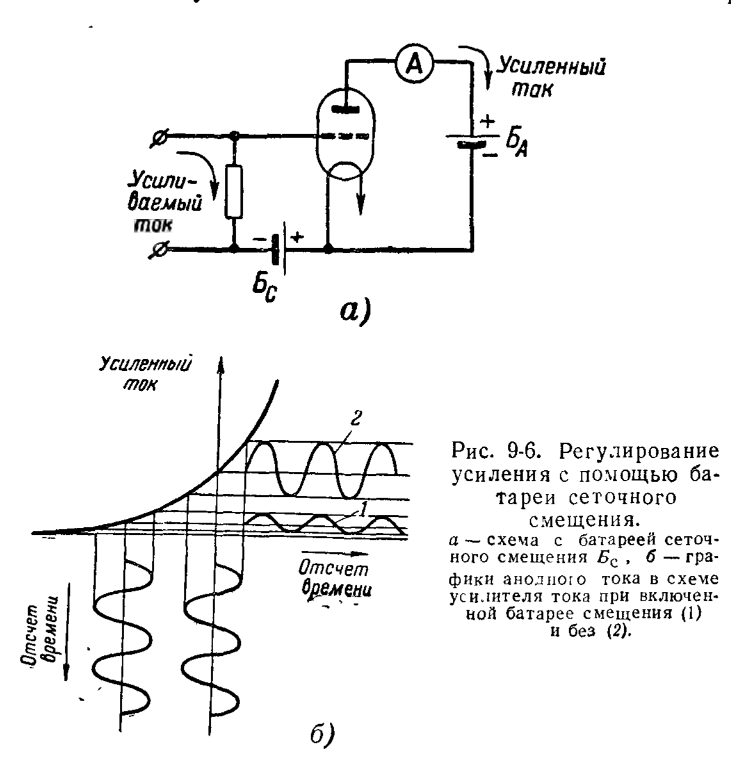


Рис. 9-6. Регулирование усиления с помощью батареи сеточного смещения.

а — схема с батареей сеточного смещения $Б_С$, *б* — графики анодного тока в схеме усилителя тока при включенной батарее смещения (*1*) и без (*2*).

исследовать, как изменяется анодный ток, то мы могли бы воспользоваться разобранным выше на рис. 9-5 построением. Правда, синусоида сеточного напряжения теперь уже будет отличаться постоянным слагаемым, т. е. будет на графике (рис. 9-6,*б*) смещена на величину этого слагаемого. Поэтому-то напряжение батареи, включенной между сеткой и катодом, и называют сеточным смещением. На рис. 9-6,*б* проведено построение анодного тока для двух случаев: 1) когда сеточное смещение отсутствует и 2) когда сеточное смещение отрицательно. Во втором случае анодный ток гораздо меньше. Изменение усиления при

введении в схему батареи, создающей отрицательное сеточное смещение, широко используется в технике.

Вращая ручку регулятора громкости радиоприемника или телевизора, мы тем самым перемещаем ползунок реос-

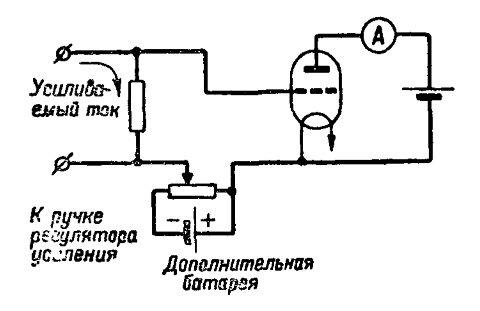


Рис. 9-7. Усилитель тока с плавной **регулировкой** усиления.

тата, с которого снимается дополнительное сеточное смещение для одной из ламп усилителя приемника. Такая схема с плавной регулировкой усиления показана на рис. 9-7.

9-4. УСИЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ. УСИЛЕНИЕ МОЩНОСТИ

В электронных приборах обычно используются усилители напряжения, в которых в анодной цепи включено высокоомное сопротивление (рис. 9-8). В основных чертах работа таких усилителей мало чем отличается от работы усилителей тока. При анализе работы усилителей напряжения надо только обращать внимание на изменение анодного напряжения лампы. Это напряжение уже не будет равно напряжению анодной батареи, так как при протекании анодного тока происходит падение напряжения в нагрузочном сопротивлении, включенном в анодной цепи. Схема рис. 9-8 позволяет получать усиление не только по напряжению, но и по мощности. В высокоомном сопротивлении нагрузки протекает сравнительно большой анодный ток и выделяет-

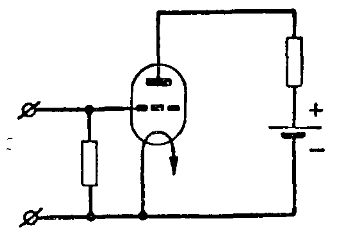


Рис. 9-8. Принципиальная схема усилителя напряжения.

ся гораздо бо́льшая мощность, чем та, которая расходуется в сеточном сопротивлении при протекании по нему усиливаемого тока. Откуда же берется эта мощность?

Схема рис. 9-8, конечно, не «вырабатывает» мощности. Избыточная мощность, выделяемая в сопротивлении нагрузки, поставляется за счет расходования энергии анодной батареи. Триод только управляет этим расходованием. И мощность, затрачиваемая в сеточной цепи, позволяет лишь регулировать расходование мощности анодной батареей. Таким образом, в усилителе осуществляется только превращение электрической энергии, отдаваемой источником постоянного напряжения, в электрическую энергию переменного тока.

9-5. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В УСИЛИТЕЛЕ

Как можно изменить коэффициент усиления усилителя, не меняя ни лампы, ни данных его схемы? Представим себе такой случай. На сетку лампы каким-либо образом попадает часть или все напряжение, которое получается на нагрузке. Не будем сейчас уточнять способ, при помощи которого можно осуществить такой опыт.

Очевидно, что это напряжение может либо складываться с напряжением генератора, подключенного к сетке, либо из него вычитаться. Если это напряжение складывается, то общее напряжение на сетке лампы окажется большим, а следовательно, большим будет и напряжение в нагрузке. При этом усиление как бы увеличится.

Если добавочное напряжение вычитается, то, очевидно, сумма напряжений будет меньше напряжения генератора, и усиление будет как бы уменьшаться.

В первом случае такую связь называют положительной, во втором — отрицательной. Поскольку в этой связи осуществляется передача части напряжения с выхода обратно на вход усилителя, такая связь получила название обратной связи.

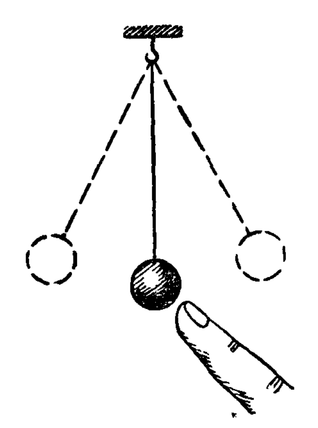
Итак, мы установили, что могут существовать положительная обратная связь и отрицательная обратная связь и что

при положительной обратной связи коэффициент усиления увеличивается, при отрицательной — уменьшается.

9-6. ЛАМПОВЫЙ ГЕНЕРАТОР

Электронная лампа с сеткой может быть применена для создания ламповых генераторов переменного тока. Ламповые генераторы позволяют получать напряжения в очень широкой области частот — от долей герца до десятков тысяч мегагерц[1]. Ламповые генераторы работают в передатчиках радиостанций и радиолокаторов, служат для получения токов высокой частоты, используемых при поверхностной закалке металлов, при сушке лакокрасочных покрытий и т. д.

Конечно, переменные напряжения можно получать и с помощью машинного генератора переменного тока, опи-



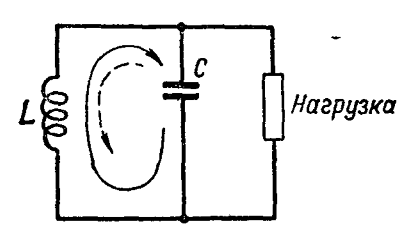


Рис. 9-9. Колебания подвешенного на нити тяжелого шарика и колебательный разряд конденсатора в электрической схеме, содержащей индуктивность.

санного в § 6-4. Однако такой генератор обладает целым рядом недостатков: достаточно сложен, имеет вращающиеся части, не позволяет получать очень высоких частот.

Напряжение нужной частоты можно получить, как мы знаем, при разряде конденсатора в контуре, содержащем индуктивность. При этом энергия, запасенная в начальный момент в электрическом поле конденсатора, периодически преобразуется в энергию магнитного поля индуктивности и затем снова в энергию поля конденсатора. Напряжение на конденсаторе периодически изменяется. Эти изменения удобно сравнивать с механическими колебаниями, например с качаниями грузика, подвешенного на нити (рис. 9-9).

Если в начальный момент мы сообщим грузику энергию, отведя его толчком в сторону, то он начинает коле-

---

[1] Напоминаем, что 1 *гц* соответствует частоте — одно колебание в секунду. Частота 1 *Мгц* — миллион колебаний в секунду.

баться. Высота его подъема при этом изменяется аналогично изменениям напряжения на конденсаторе. Поэтому-то мы и назвали электрический процесс в контуре колебаниями.

Однако и механические колебания грузика и электрические колебания в контуре постепенно затухают. Мы знаем, что это связано с потерями энергии. В случае грузика — это потери на трение. В случае контура — это потери, возникающие при протекании электрических токов в сопротивлениях контура, напрнмер в сопротивлении нагрузки (рис. 9-9).

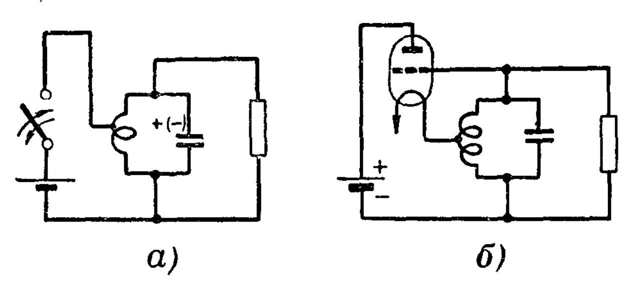


Рис. 9-10. Электрическая схема незатухающих электрических колебаний.
а — принцип работы, *б* — схема с электронной лампой.

Чтобы поддерживать колебания на неизменном уровне, необходимо пополнять расходуемую энергию. Например, грузику можно сообщать каждый раз в такт колебаниям дополнительный толчок. Совершенно аналогично можно поддерживать незатухающие колебания и в колебательном контуре. Для этого в такт колебаниям к цепи подключается батарея, как показано на рис. 9-10.

Роль выключателя в схеме может выполнять электронная лампа с сеткой. Ток такой лампы управляется напряжением на сетке, поэтому сетка лампы подключается к одной из пластин конденсатора (рис. 9-10,*б*). Когда эта пластина заряжена положительно, положительное напряжение (по отношению к катоду) поступает и на сетку лампы и лампа хорошо пропускает ток батареи в схему. Это соответствует включенному положению батареи. Когда же конденсатор перезарядится, изменит знак и напряжение на сетке. Оно становится отрицательным и может даже запереть ток лампы. Это соответствует отключенному положению батареи.

В рассмотренной схеме колебательный контур имеет три точки присоединения. При этом управляющее работой лампы напряжение снимается с части индуктивности контура. Поэтому схема называется индуктивной трехточечной. На рис. 9-1 изображена принципиальная схема другого генератора незатухающих колебаний, которая называется емкостной трехточечной. На этот раз управляющее напряжение на сетку лампы уже снимается с части емкости контура. Принцип же работы схемы ничем не отличается от предыдущего.

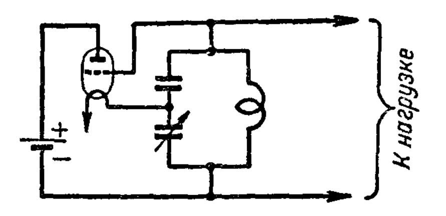


Рис. 9-11. Ламповый генератор переменного тока регулируемой частоты. Увеличивая емкость колебательного контура, уменьшаем тем самым частоту электрических колебаний, и наоборот.

Во всех ламповых генераторах происходит преобразование энергии батареи в энергию электрических колебаний. Никаких других внешних источников напряжений в схеме нет.

Частота лампового генератора равна собственной частоте его колебательного контура. Она зависит, как мы знаем, только от величины индуктивности и емкости в контуре. Обычно в колебательных контурах размещают переменные индуктивности или емкости. Изменяя их величину, можно производить настройку генератора на нужную частоту.

Особенно широко применяются электронные схемы в технике связи. Благодаря развитию электроники стало возможно создание надежной беспроволочной связи по радио, видение на расстояние — телевидение и радиолокация.

9-7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Каждый наверное наблюдал разбегание волн на гладкой водной поверхности, бросая в воду камень. Колебание частичек воды, вызванное в месте падения, распространяется, разбегаясь в виде волны, на большие расстояния. Сами частички воды после прохождения волны остаются на месте. Распространяется только колебательное состояние — волна или волновое возмущение. Тем не менее волновое возмущение переносит определенную энергию и может тем самым совершать работу. Если на воде плавает

щепочка, то проходящая волна может ее раскачать, передать ей часть своей энергии.

Возмущение, вызванное падением камня в воду, напоминает процессы, возникающие при изменении электрического или магнитного полей. Электрическое и магнитное поля создаются заряженными телами и проводниками, по которым текут электрические токи. Эти поля возникают не мгновенно, а за некоторое время. Скорость распространения полей в пустоте равняется очень большой величине, приблизительно равной 300 тыс. *км* в секунду. Всякие изменения электрического поля или магнитного поля сопровождаются возникновением кратковременных, связанных между собой электрического и магнитного полей—электромагнитного поля. Электромагнитное поле существует в виде электромагнитных волн, которые с огромной скоростью — 300 000 *км/сек* — разбегаются от места, где были произведены изменения поля путем перемещения зарядов, изменения токов и тому подобное. Если такие изменения производить непрерывно с большой частотой, то в окружающем пространстве установятся непрерывно разбегающиеся электромагнитные волны. Эти волны переносят часть той энергии, которая затрачивается на изменения электрического или магнитного поля в месте его возникновения. Интересно отметить, что существование электромагнитного поля — электромагнитных волн — было в начале предсказано теоретически. На их существование впервые указал в середине XIX в. английский физик и математик Джемс Клерк Максвелл. Однако потребовалось еще длительное время, прежде чем была выяснена возможность широкого использования электромагнитных волн в технике.

9-8. РАДИОВОЛНЫ, АНТЕННЫ

В радиотехнике используют электромагнитные волны, получаемые с помощью специальных устройств, называемых антеннами. Такие электромагнитные волны называются радиоволнами.

Простейшая антенна представляет собой обыкновенный провод, подвешенный над землей. Генератор высокой частоты передатчика радиостанции присоединяется одним концом к антенне, а другим к земле (рис. 9-12). Между проводом антенны и землей создается электрическое поле (как в емкости). А мы знаем, что если на емкости, включенной в цепь, изменяется напряжение, то в цепи проходит электрический ток. Этот переменный ток в свою очередь

создает переменное магнитное поле вокруг антенны. Изменяющиеся электрическое и магнитное поля и образуют электромагнитные волны, уходящие в пространство, окружающее антенну. Этими радиоволнами излучается и уносится прочь некоторая часть энергии, расходуемой высокочастотным генератором. Радиоволны распространяются в пространстве, огибая весь земной шар. Поэтому и в Антарктиде на Южном полюсе советские полярники могут слушать у своих радиоприемников голос Москвы — сигналы московских радиостанций.

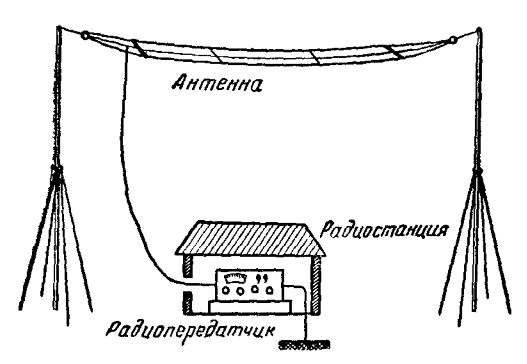


Рис. 9-12. Принципиальная схема установки радиостанции.

Радиоволны не только излучаются с помощью антенн, но и принимаются с помощью радиоприемных антенн, радиоприемников и телевизоров. Радиоприемная антенна ничем принципиально не отличается от передающей антенны. В простейшем случае это снова отрезок провода, подвешенный над землей. Этот провод одним концом подключается к приемнику и через входное сопротивление приемника к земле. Сам провод антенны и земля образуют емкость, которая и замыкает цепь антенны (рис. 9-13).

Каким образом происходит прием радиоволн? Мы знаем, что радиоволна представляет собой распространяющееся в пространстве переменное электрическое и магнитное поля. Переменные поля индуцируют токи в контуре антенны, как это было описано в § 3-9. Конечно, эти токи очень слабы. Поэтому в радиоприемнике токи антенны усиливаются.

Радиоприемники. В ламповых радиоприемниках работают электронные лампы. Обычно в приемнике несколько

ламп. Если приемник предназначен для включения в сеть переменного тока, то одна из ламп работает в качестве выпрямителя (гл. 5), который заменяет анодную батарею в так называемых батарейных приемниках. Одна или несколько ламп работают в усилителях. В последнем случае несколько усилителей соединяются один за другим, усиленный сигнал с выхода первого усилителя поступает на вход второго и т. д. В этом случае говорят, что усилитель состоит из нескольких к а с к а д о в.

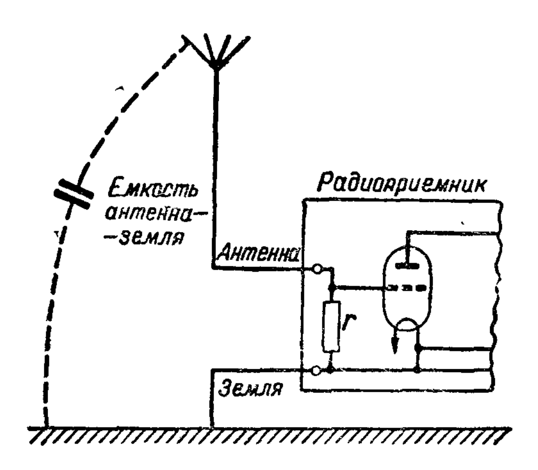


Рис. 9-13. Приемная антенна подключена к зажиму „антенна“ приемника. Условно показана емкость между антенной и землей.

r — входное сопротивление приемника. Виден первый каскад усилителя приемника.

Каскад — это одна ступень усиления. Очевидно, что несколько каскадов дают большее усиление. В приемниках с несколькими каскадами усиления слышны сигналы более удаленных радиостанций.

Радиолокация. Еще А. С. Попов, применяя впервые созданные им радиоустановки, обнаружил, что когда между передатчиком и приемником появлялось какое-либо препятствие (корабль, например), громкость приема резко падала.

Этот факт и лег в основу радиолокационной техники.

Сигнал от генератора на радиолокационной станции посылается в антенну. Электромагнитная волна бежит от

антенны и, встречая препятствия на своем пути (самолет, например), отражается обратно.

Радиолокационная станция имеет не только генератор, но и приемник. Приемник принимает отраженный сигнал. Станция имеет устройство, позволяющее точно определить время, за которое радиоволны проходят от станции до препятствия и обратно. Обычно это устройство напоминает электронный осциллограф (гл 5).



Александр Степанович Попов (1859 — 1906 гг.).

Если известна скорость распространения радиоволн, то нетрудно определить и расстояние от места отражения. Очевидно, что волна проходит путь до объекта дважды: один раз от станции до объекта и один — обратно. Следовательно, за время T волна пройдет путь

$$2l = vT,$$

где l — расстояние до объекта;
v — скорость волны.

Отсюда уже нетрудно определить это расстояние:

$$l = \frac{vT}{2}.$$

Скорость волны в воздухе 300 000 *км/сек.* С такой громадной скоростью волна пробегает расстояние до объекта и обратно за очень малые доли секунды. И опять электронные схемы позволяют точно измерить эти доли.

Радиолокационные станции могут не только обнаружить объект и измерить до него расстояние, но и могут определить, в каком направлении находится объект.

Определение мест повреждения в линии электропередачи. Советские ученые выяснили, что волны могут распространяться и по проводам линии передачи. Возбуждая в линии

передачи электромагнитные волны, можно определить место повреждения в линии.

При наличии в линии обрыва или короткого замыкания электромагнитные волны отражаются от места повреждения и возвращаются обратно. С помощью соответствующих электронных приборов можно определить и время движения волн и, следовательно, как и в радиолокации, расстояние до места повреждения.

Особенную ценность представляет этот метод для обнаружения места повреждения в кабеле. Кабель обычно прокладывается под землей или под водой. Отыскать место повреждения трудно — нужно отрывать кабель из-под земли или вынимать из воды. Да и то при этом оболочка кабеля может быть целой, повреждена только внутренняя изоляция между жилами. Установить место повреждения трудно.

С помощью прибора повреждение обнаруживается мгновенно. Современные приборы позволяют при этом установить также и характер повреждения.

Трудно даже перечислить все те достижения, которые обязаны созданию электронных приборов. Современная электротехника без них немыслима. Однако, как читатель заметил, электронные приборы только преобразуют электрическую энергию, полученную от каких-либо других источников энергии, которыми в большинстве случаев являются электрические машины. Поэтому в главах 10 и 12 будет рассмотрено их устройство и принцип действия.

9-9. ПОЛУПРОВОДНИКИ

В последние годы начинают широко применять полупроводниковые приборы. Ими все чаще заменяют и электронные лампы. Полупроводниковые приборы экономичнее ламп. Их применение позволяет в несколько раз уменьшить расход электрической энергии. Кроме того, полупроводниковые приборы гораздо долговечнее и имеют очень малые размеры. Электрические аппараты на полупроводниках: радиостанции, телевизоры, выпрямители и др. — значительно меньше по размерам и легче по весу.

Строение твердых полупроводников. Температурное движение. Атомы твердого полупроводника расположены на определенных расстояниях друг от друга. Они образуют, как и в металлах, кристаллическую решетку. В этих поло-

жениях атомы удерживаются силами взаимного притяжения и отталкивания. Силы взаимодействия атомов определяют прочность и упругость твердых тел. Эти силы преодолевает, например, резец при обработке детали на токарном станке. Благодаря этим невидимым силам могут противостоять натиску воды гигантские плотины современных электростанций.

Это не значит, что силами взаимодействия атомы удерживаются неподвижно. Они непрерывно беспорядочно колеблются. Это хаотическое колебательное движение усиливается с нагреванием тела и ослабляется при уменьшении температуры. Поэтому такое движение атомов называют температурным движением.

При температурном движении различные атомы движутся по-разному. То одни из них, то другие колеблются с большей или меньшей интенсивностью. При колебаниях отдельные атомы сталкиваются. Колебания одного атома передаются другому. Приблизительно так же передают при соударении свое движение упругие биллиардные шары. Средняя энергия таких колебаний атомов зависит только от температуры тела. В большинстве веществ она просто приближенно равна температуре. Правда, температуру при этом надо измерять не в градусах, как мы привыкли, а в джоулях или в килограммометрах (*кГ·м*).

Температура тела характеризует среднюю энергию беспорядочного (хаотического) движения его атомов. При температуре —273° С эта энергия равна нулю. Атомы неподвижны. Поэтому температура —273° С называется температурой абсолютного нуля. Это самая низкая температура, которая никогда и нигде не была и не может быть получена. При комнатных температурах энергия колебаний атомов еще очень мала. Однако она вполне ощутима. Прикоснитесь к стакану с горячим чаем. Вы чувствуете тепло. Что же происходит? При касании колеблющиеся атомы нагретого стекла ударяют по атомам вашего тела, раскачивают их. Так происходит передача тепла от более нагретых тел. Так же создаются условия ощущения тепла или холода.

Подвижные заряды. Дырки и электроны. Электроны полупроводника удерживаются ядрами своих атомов сильнее, чем электроны металлов (§ 5-2). Они не могут, как электроны металлического проводника, ускоряться внешним электрическим полем. Не могут поддерживать электрический ток.

Подвижные заряды в полупроводнике образуются при ионизации. Под действием тепла, света, космических лучей и других возбудителей электроны вырываются из отдельных атомов и переносятся на другие. Получаются положительные и отрицательные ионы. Движение образовавшихся при ионизации зарядов в электронных полупроводниках следует отличать от сквозного движения ионов в веществе. Сквозному движению ионов в электронном полупроводнике препятствуют окружающие его нейтральные атомы. Перемещение зарядов происходит путем их передачи от одного атома к другому. Например, отрицательно зарядившийся ион при соударении с нейтральным атомом передает ему свой избыточный электрон. Избыточный электрон тем самым, как эстафетная палочка, передается от атома к атому. Так продвигается свободный отрицательный заряд — электрон. Точно так же движется положительный заряд. Положительный ион отбирает при столкновении недостающий электрон у соседнего нейтрального атома. Этот атом в свою очередь становится положительным ионом. Такой ион как бы переносит пустое место, на которое может быть захвачен электрон. Поэтому подвижные положительные заряды в полупроводнике называют дырками. В конечном счете и движение электрона и движение дырки обусловливаются взаимным переходом электронов между соударяющимися атомами. Отличие заключается лишь в том, что в промежутках между электронными переходами движется либо отрицательный заряд, либо положительная дырка.

Рекомбинация. Дырки и свободные электроны блуждают внутри полупроводника. При столкновении их между собой положительно заряженная дырка легко захватывает электрон у отрицательно заряженного иона. Образуются два нейтральных атома, а подвижные заряды: дырка и электрон — пропадают. Такое столкновение, приводящее к исчезновению подвижных зарядов, называют рекомбинацией. Чем больше подвижных зарядов в полупроводнике, тем чаще происходят рекомбинации. Особенно часто происходят рекомбинации у поверхности полупроводника. Под действием ионизации и рекомбинаций устанавливается определенная концентрация подвижных зарядов.

Электрический ток в полупроводниках. Прямоугольный брусок полупроводника зажмем между двумя металлическими пластинками — электродами. Если к электродам подключить батарею, то на них возникнут электрические

заряды, создающие электрическое поле между пластинами. Под действием этого поля отрицательные ионы, несущие избыточные электроны, сместятся к положительно заряженной пластине. Положительные дырки сдвинутся к отрицательной пластине. Поэтому передача подвижного электрона будет происходить главным образом по направлению к положительному электроду, а дырки — в обратном направлении, к отрицательному электроду. Подвижные заряды: свободные электроны и дырки — образуют соответственно электронный и дырочный электрические токи. Величина этих токов прямо пропорциональна концентрациям подвижных зарядов. Суммарный ток полупроводника складывается из электронного и дырочного. Напомним еще раз, что направление движения свободных электронов прямо противоположно направлению создаваемого ими электрического тока. За направление тока принимается направление движения положительного заряда. Поэтому направления дырочного и электронного токов совпадают.

Термическая ионизация. Термистор. Тепловое движение атомов полупроводника создает термическую ионизацию. При тепловых колебаниях часть атомов получает энергию, значительно бо́льшую того среднего значения, которое измеряется температурой. Соударения таких атомов приводят к выбиванию электрона одного из них и захватыванию выбитого электрона другим атомом. Увеличение температуры приводит к возрастанию доли атомов, энергия колебаний которых достаточна для выбивания электронов. Число ионизаций возрастает. Возрастает тем самым и концентрация подвижных зарядов.

Поместим снова наш полупроводник между плоскими пластинками и подключим к ним батарею. Чем больше концентрация подвижных зарядов, тем больший ток будет проходить через полупроводник при одинаковом напряжении батареи. Как изменяется сопротивление полупроводника? Сопротивление полупроводника уменьшается при увеличении температуры, так как при этом возрастают концентрация подвижных зарядов и переносимый ими ток. Изменение сопротивления полупроводника при изменении температуры позволило сконструировать полупроводниковый термометр — термосопротивление или термистор.

Простейшая схема измерения температуры показана на рис. 9-14. Изменение температуры приводит к изменению тока в электрической цепи. Ток измеряется миллиамперметром. Схема снабжается градуировочным графиком или

таблицей, в которой значениям тока сопоставлены соответствующие значения температуры.

Так же работают полупроводниковые приборы, служащие для измерения интенсивности других источников ионизации. Полупроводниковые приборы, сопротивление которых заметно уменьшается под действием света, могут служить для измерения освещенности (рис. 9-15). Такие приборы называют фотосопротивлениями. Фотосопротивления отличаются малыми размерами и высокой чувствительностью.

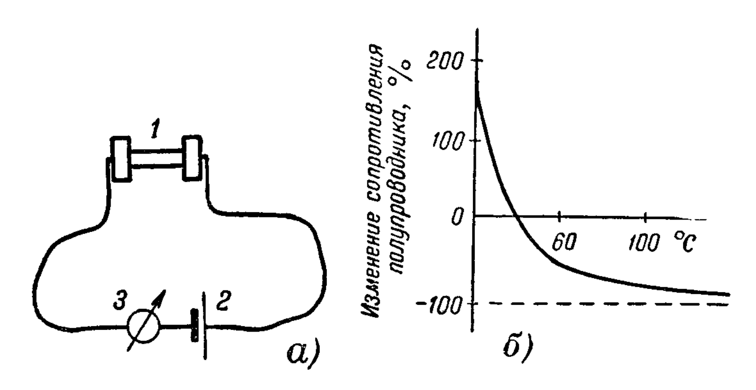


Рис. 9-14. Применение термосопротивления для измерения температуры.

а — схема, *1* — термосопротивление марки ММТ-1 (в натуральную величину); *2* — батарея: *3* — миллиамперметр; *б* — кривая зависимости изменения сопротивления термистора от температуры.

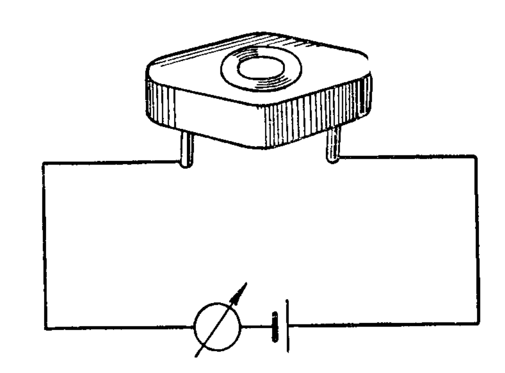


Рис 9-15. Измерение освещенности при помощи фотосопротивления ФС-А1.

Примесные полупроводники. Полупроводники *p*- и *n*-типов[1]. В нормальных условиях концентрация подвижных зарядов, образуемых в результате ионизаций основных атомов полупроводника, крайне мала. Поэтому широко используются так называемые примесные полупроводники, образование подвижных зарядов в которых облегчено. Такие полупроводники получают путем специальной технологической обработки. В простейших примесных полупроводниках между обыкновенными атомами полупроводника имеются атомы некоторых химических элементов. Примеси других атомов сильно изменяют электрические свойства полупроводника.

Если примесные атомы сильнее удерживают электроны, чем основные атомы полупроводника, то такой примесный полупроводник называется дырочным или полупроводником *p*-типа. Атомы примеси при столкновениях легко захватывают электроны у основных атомов полупроводника и длительно удерживают их. Электроны оказываются связанными на примесях и не могут участвовать в проводимости. Подвижными зарядами в *p*-проводниках являются дырки: основные атомы обычным образом обмениваются избыточным положительным зарядом, образовавшимся с помощью примеси.

Примесный полупроводник называется электронным или полупроводником *n*-типа, если атомы примесей слабее удерживают свои электроны. Таковы, например, атомы фосфора. Ясно, что в таком полупроводнике обычно наблюдается электронная проводимость. Подвижные дырки в нем почти не образуются. Положительно заряжаются примеси, которые длительно остаются ионизированными, будучи не в силах отобрать недостающие электроны у основных атомов. Дырочная проводимость в полупроводниках *n*-типа или электронная проводимость в полупроводниках *p*-типа заметны обычно лишь в тех случаях, когда в полупроводники соответствующие подвижные заряды вносятся какими-либо посторонними источниками.

Кристаллические диоды. Так называются полупроводниковые приборы, обладающие свойством пропускать ток только в одном направлении. Кристаллические диоды (рис. 9-16) широко применяются взамен электронных ламп. Важным

---

[1] Эти названия общеприняты. Читайте полупроводники пэ и эн типов (*p* — пэ и *n* — эн).

преимуществом полупроводников перед электронными лампами является их высокая экономичность. На подогрев катода электронных ламп затрачивается значительная электрическая мощность. В полупроводниковых диодах необходимость в нити накала отпадает. Подвижные заряды эмиттируются внутри полупроводника без специального подогрева.

Разберем работу плоскостного диода. Так называют диоды, состоящие из полупроводников двух типов *p* и *n*,

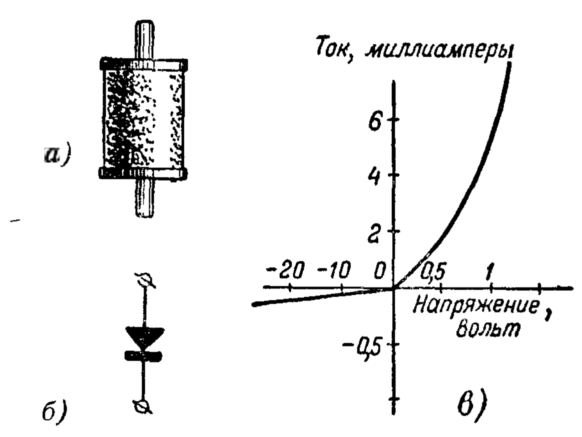


Рис. 9-16 Германиевый диод.

а — внешний вид; *б* — схематическое изображение; *в* — вольт-амперная характеристика. Масштабы напряжений и токов в разных направлениях выбраны различными, поэтому характеристика в начале координат имеет излом.

разделенных плоской границей. Граница раздела *p* и *n* полупроводников называется *p-n*-переходом. Этот переход в таких диодах играет роль катода, эмиттирующего дырки и электроны. Для уяснения механизма эмиссии рассмотрим простой случай, когда полупроводник *p*-типа имеет слишком мало примесей. При этом количество дырок, образуемых в полупроводнике, недостаточно для поддержания заметного тока. Высокая проводимость может быть обусловлена только подвижными электронами, образующимися в *n*-полупроводнике.

Все это очень напоминает работу вакуумной двухэлектродной лампы (рис. 9-17). При нагревании катода лампы около него образуется облачко отрицательных зарядов. Такое же облачко отрицательных зарядов создается в *n*-полупроводнике вблизи *p-n*-перехода. Это облачко

образуется подвижными электронами n-полупроводника, проникающими в p-область через границу раздела.

Отрицательное облачко электронов удерживается вблизи границы нескомпенсированным положительным зарядом примесных атомов n-слоя, который образуется при уходе электронов в p-слой (положительные и отрицательные заряды притягиваются).

Анодом полупроводника с p-n-переходом служит электрод, нанесенный на полупроводник p-типа, катодом — на

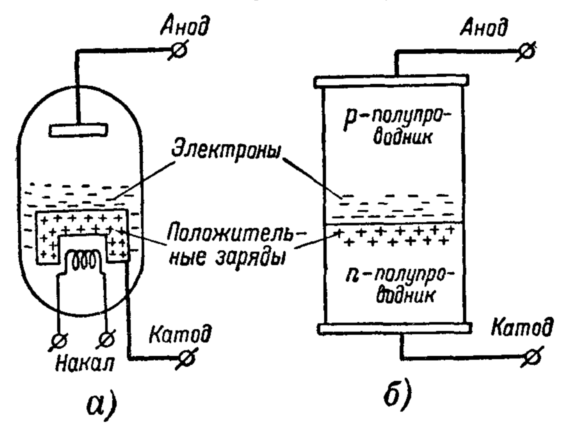


Рис. 9-17. Распределение зарядов.
а — двухэлектродная лампа, *б* — кристаллический диод.

n-полупроводник. Направления, в которых кристаллический диод и двухэлектродная лампа хорошо и плохо проводят электрический ток, совпадают. Замкнем цепь, присоединив к катоду и аноду диода батарею. Если к аноду подключен плюс батареи, то подвижные электроны переходят в p-полупроводник и поддерживают протекание электрического тока. При подключении плюса батареи к катоду подвижные электроны отсасываются от p-полупроводника, и он испытывает недостаток в подвижных зарядах. Проводимость падает. На рис. 9-16 показана вольт-амперная характеристика диода из германиевого полупроводника. Следует отметить, что p-n-переход имеет большую емкость. Это обусловлено большой поверхностью p-n-границы. Через емкость p-n-перехода замыкаются токи высокой частоты. Поэтому в высокочастотных устройствах плоскостные кристаллические диоды с p-n-переходом заменяют точечными диодами. Источником подвижных зарядов (эмиттером)

в точечных кристаллических диодах служит точечный контакт, осуществляемый заостренным металлическим проводом. В зависимости от типа полупроводника диода точечный электрод является или катодом, эмиттирующим электроны (в случае *p*-полупроводника), или анодом, эмиттирующим дырки (в случае полупроводника *n*-типа). Современные точечные диоды используются в широкой области частот, достигающих миллионов мегагерц.

Транзистор. Наибольшим успехом полупроводниковой электроники явилось изобретение в 1949 г. кристаллического триода — транзистора. Транзистор с успехом заменяет управляемую трехэлектродную лампу. В нем нет цепи накала, он значительно долговечнее и надежнее в работе. От электронных ламп кристаллический триод выгодно

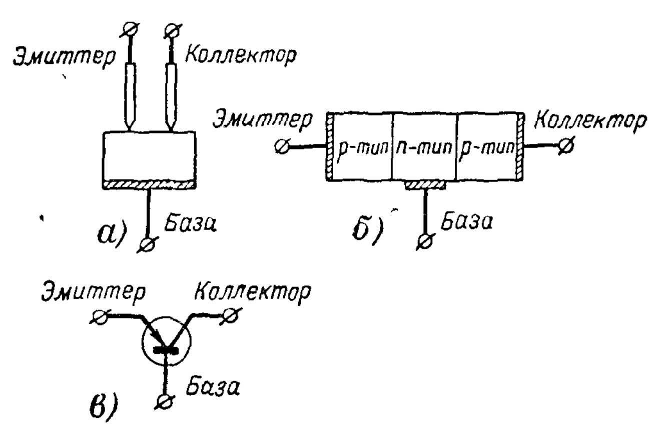


Рис. 9-18. Схемы транзисторов.

а — точечный транзистор, *б* — транзистор с *p-n-p* переходами; *в* — схематическое изображение транзистора.

отличается также размерами и весом. Наибольшее распространение получили транзисторы с *n-p-n* и *p-n-p*-переходами и точечные транзисторы.

Роль катода электронной лампы в транзисторе играет в зависимости от типа *p-n*-переход или точечный контакт. Соответствующий электрод называют эмиттером. Второй *p-n*-переход или точечный контакт играет роль анода и называется коллектором. Роль управляющего электрода — сетки играет плоский металлополупроводниковый контакт, называемый базой (рис. 9-18).

Рассмотрим работу n-p-n транзистора. Между базой и коллектором включается батарея. Плюс батареи присоединяется к такому электроду, чтобы коллекторный переход был заперт. В разбираемом случае плюс батареи подключается к коллектору. При этом подвижные заряды: дырки, создаваемые в p-слое, и электроны, возникающие в n-слое,

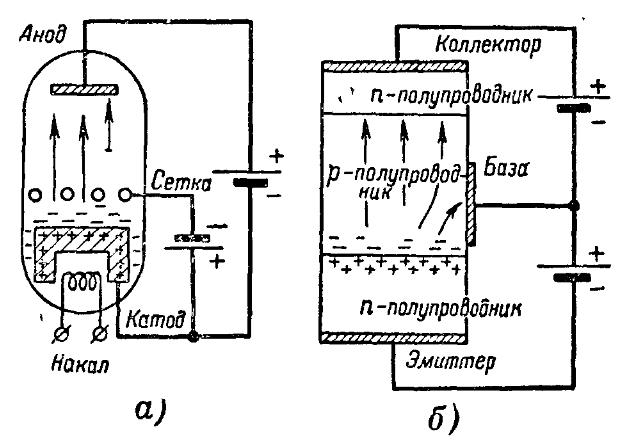


Рис. 9-19. Работа лампового и кристаллического триодов. Стрелками показано движение электронов.

отсасываются от коллекторного перехода, что уменьшает электрический ток. Между базой и эмиттером включается небольшое управляющее напряжение в таком направлении, чтобы эмиттируемые электроны переходили в p-слой полупроводника. Однако большая часть этих электронов не достигает базы, а вытягивается электрическим полем к коллектору через коллекторный p-n-переход. Так же, минуя сетку, попадают на анод электронной лампы электроны, ускоряемые сеточным напряжением (рис. 9-19).

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

10-1. НАЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Электрические машины служат для двух целей. Во-первых, для преобразования механической энергии в электрическую. Это генераторы, устанавливаемые на электрических станциях и приводимые в движение или тепловыми

½ 11 Зак. 621

двигателями, или энергией падающей воды. Во-вторых, для приведения в движение станков, трамвайных вагонов и т. п. Это двигатели, устанавливаемые в местах потребления энергии и приводимые в движение электрическим током.

Первый работающий двигатель постоянного тока был изобретен и сконструирован русским академиком Б. С. Якоби более 100 лет назад.

О том, как устроен генератор переменного тока, было вкратце рассказано в § 6-3. Почти так же устроен и генератор постоянного тока, но он имеет устройство, выпрямляющее переменный ток и превращающее его в постоянный. Это устройство называется коллектором, и о нем будет рассказано несколько позже.

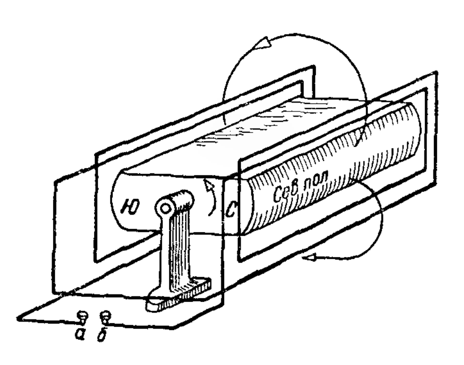


Рис 10-1. При вращении постоянного магнита в проволочных витках будет наводится переменная э. д. с. От зажимов *а*, *б* можно получить переменный ток.

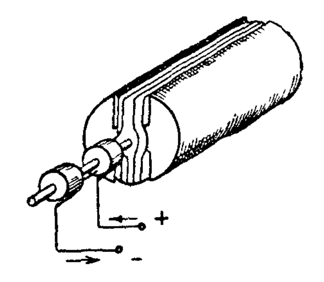


Рис. 10-2. Вращаемый электромагнит с подводом тока через кольца.

В генераторе происходит превращение механической энергии, т. е. энергии вращения, в электрическую энергию. Механический двигатель вращает ротор генератора. Превращение энергии основано на известном нам законе электромагнитной индукции. Вращение ротора происходит в магнитном поле, а на поверхности ротора уложена обмотка, в витках которой индуктируется напряжение. В обмотке ротора возникает э. д. с. Если замкнуть обмотку через какое-нибудь сопротивление или накоротко, в ней появится ток.

Возможно и другое решение задачи. Можно уложить обмотку в неподвижной части машины (в статоре) и вращать магнит, хотя бы и постоянный. Создаваемое этим

магнитом поле будет вращаться относительно статора, и поток, пронизывающий витки статорной обмотки, будет меняться. Ясно, что в этом случае в обмотке будет индуктироваться напряжение. Такой генератор показан на рис. 10-1. Вместо постоянного магнита можно вращать электромагнит, возбуждая магнитное поле постоянным током. Ток можно подводить через щетки, скользящие по кольцам, связанным с обмоткой электромагнита (рис. 10-2).

Условимся относительно некоторых названий. Обмотку электромагнита, создающего магнитное поле, будем называть обмоткой возбуждения, а ту часть машин, на которой она расположена,—индуктором. Обмотку, в которой индуктируется напряжение, будем называть якорной обмоткой, а ту часть машины, где она расположена,— якорем.

В машинах постоянного тока якорь является ротором, а индуктор — статором.

Итак, основными элементами машины постоянного тока являются электромагниты, коллектор и якорь, к рассмотрению их мы и переходим.

10-2. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электромагнит должен создать магнитное поле, линии которого сцепляются с витками якорной обмотки. Магнитные линии, проходящие мимо обмотки, совершенно бесполезны. Величина магнитного потока должна быть по возможности большой, так как чем больше магнитный поток, тем больше величина напряжения, индуктируемого в якоре. По этим соображениям желательно направить путь магнитных линий по стали, так как намагниченная сталь создает внутри себя добавочный магнитный поток (§ 4-2). Поэтому и сердечник электромагнита и якорь должны быть сделаны из стали. Путь магнитных линий в генераторе постоянного тока показан на рис. 10-3. Здесь надо обратить внимание на направление токов в обмотках возбуждения. Применив правило штопора и к верхнему и к нижнему сердечникам, мы увидим, что создаваемые ими магнитные линии имеют в якоре одно и то же направление и, следовательно, магнитные потоки складываются. Верхний сердечник является южным полюсом, нижний—северным. Такая магнитная система имеет одну пару полюсов.

На рис. 10-4 изображена более сложная магнитная система. Здесь мы имеем два северных и два южных полюса. Направление токов в обмотках возбуждения выбирается

с таким расчетом, чтобы соседние полюсы были разноименными, т. е. чтобы рядом с северным находился южный полюс, и т. д. Такая магнитная система имеет две пары по-

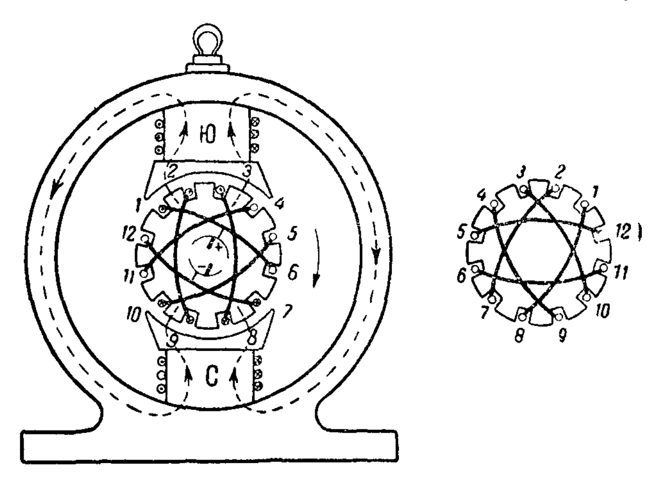


Рис. 10-3. Генератор постоянного тока. Справа показаны соединения обмотки с задней стороны якоря.

люсов. Существуют машины и с бóльшим числом полюсов, но их число будет непременно четным.

Часть пути магнитные линии должны все же проходить по воздуху. Якорь должен вращаться, а для этого необходим воздушный зазор между ним и полюсами. Однако величину этого зазора делают настолько малой, насколько это позволяет неизбежное изнашивание подшипников машин: нельзя допустить того, чтобы якорь при вращении ударялся в полюсы.

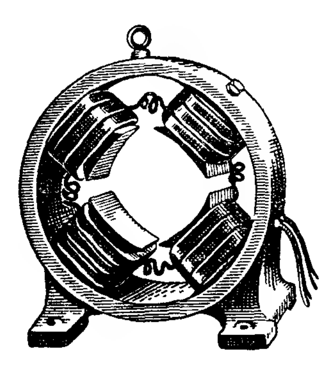


Рис. 10-4. Статор четырехполюсной машины постоянного тока.

Величина магнитного потока зависит от размеров и материала машины, числа витков и величины протекающего по ним тока. В тех случаях, когда требуется изменить величину магнитного потока, в цепь обмотки возбуждения вводят добавочное сопротивление.

10-3. КОЛЛЕКТОР

Прежде чем говорить об устройстве якорной обмотки, присмотримся к тому, что делается в каждом из ее витков в отдельности. Обратившись еще раз к рис. 6-2, мы увидим, что в тот момент, когда плоскость витка перпендикулярна к направлению магнитных линий, напряжение в нем будет равно нулю. Если к концам витка присоединена какая-нибудь нагрузка, то ток в ней в этот момент также равен нулю. В сложных обмотках, составленных из многих витков, плоскости которых не совпадают друг с другом, напряжение будет проходить через нулевое значение не одновременно. Но как бы ни были расположены отдельные витки, нулевое значение напряжения будет наступать в одном и том же месте, а именно на нейтральной линии. Очевидно, что нейтральная линия располагается симметрично относительно северного и южного полюсов. В частности, в четырехполюсной машине имеется не одна, а две нейтральные линии.

Предположим теперь, что в тот момент, когда ток в витке равен нулю, происходит пересоединение проводов, связывающих генератор с потребителем, т. е. с нагрузкой. Разметим как-нибудь концы вращающегося витка, например обозначим один конец цифрой *1*, другой цифрой *2*; то же самое сделаем и с отходящими проводами, обозначив один из них цифрой *3*, другой цифрой *4* (рис. 10-5). В течение одного полупериода ток в витке генераторной обмотки направлен так, как это показано на верхней схеме. Пусть на протяжении этого полупериода конец *1* соединен с концом *3*, а конец *2* с концом *4*. Ток у потребителя направлен от конца *3* к концу *4*.

После того как этот полупериод закончился, ток в генераторе изменит свое направление. Но в этот же момент времени происходит пересоединение нагрузочных концов, и теперь конец *1* соединен с концом *4*, а конец *2* с концом *3*. Ясно, что ток потребителя попрежнему направлен от конца *3* к концу *4*.

Итак, направление тока у потребителя остается постоянным, но величина его будет меняться. В течение полупериода ток будет меняться по синусоиде, но по синусоиде выпрямленной. График такого тока показан на рис. 10-6. Его следует сравнить с графиком переменного тока. Ток следующего витка также будет выпрямленной синусоидой и, сложившись с током предыдущего витка, он сгладит коле-

бания величин тока При большом числе витков получается почти неизменный ток.

Устройство, служащее для подобного выпрямления, носит название **к о л л е к т о р а**.

В простейшем случае коллектор представляет собой две половины кольца, изолированные друг от друга. К этим полукольцам и присоединяются концы обмотки, в которой наводится переменное напряжение (рис. 10-7).

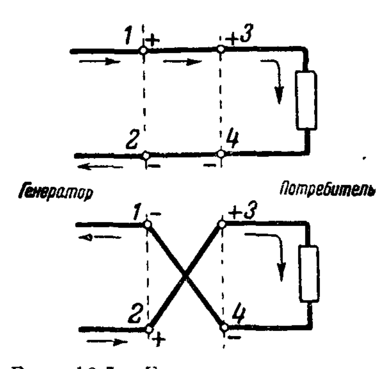


Рис. 10-5. Если пересоединять каждые полпериода генераторные концы, то ток у потребителя будет иметь постоянное направление.

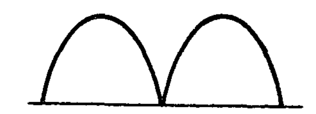


Рис. 10-6 Кривая тока в витке рис. 10-7.

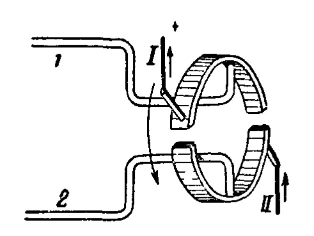


Рис. 10-7. Устройство коллектора генератора постоянного тока.

К поверхности этих вращающихся полуколец прижаты неподвижно закрепленные угольные (или медные) щетки, соединяющие обмотку генератора с внешней цепью.

Если установить щетки на нейтральной линии, мы получим устройство, автоматически осуществляющее переключение, как раз соответствующее переключению, показанному на рис. 10-5.

На рис. 10-7 показано положение полуколец, при котором щетка *I* только что перескочила на кольцо, соединенное с проводом *1*, а щетка II только что перескочила на кольцо, соединенное с проводом *2* Если ось магнитного потока направлена прямо за плоскость чертежа, момент перехода щеток соответствует моменту, когда изменяется направление напряжения.

Если магнитный поток направлен от нас за плоскость чертежа и рамка вращается в направлении, показанном на чертеже стрелкой, зажимы, к которым присоединяются щетки, могут быть обозначены знаками + (плюс) и — (ми-

рус), как это сделано на рис. 10-5. Эти знаки будут правильно указывать направление напряжения, получаемого от генератора (обязательно проверьте это самостоятельно, применяя правило правой руки).

Генератор с одной парой коллекторных пластин (два полукольца) будет давать ток постоянный по направлению, но не по величине: за каждые полоборота ток возрастает от нуля до наибольшей величины и вновь спадает до нуля.

10-4. ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ

Чтобы объяснить, как именно следует соединять между собой отдельные витки якорной обмотки, рассмотрим устройство кольцевого якоря. Кольцевой якорь представляет собой полый стальной цилиндр, на который навиты один за другим витки обмотки. Эти витки соединены между собой последовательно и образуют замкнутую цепь (рис. 10-8).

При вращении якоря магнитный поток, пронизывающий витки обмотки, будет меняться. Так, например, поток сквозь виток, находящийся под полюсом, будет равен нулю, а поток сквозь виток, находящийся на нейтральной линии, имеет наибольшее значение. В результате в каждом из витков будет возникать переменная э. д. с., изменяющаяся приблизительно по закону синуса.

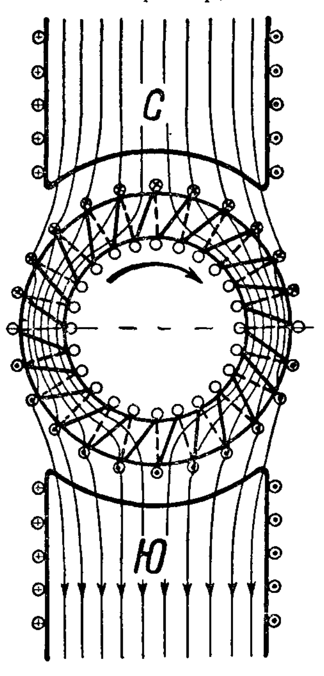


Рис. 10-8. Устройство кольцевого якоря.

Однако суммарная э. д. с. обмотки равна нулю, и при отсутствии в ней внешней нагрузки ток в ней проходить не будет. Чтобы убедиться в этом, достаточно подсчитать сумму э. д. с. в двух витках, расположенных друг от друга на расстоянии полуокружности. Рекомендуем читателю убедиться в том, что в любой момент времени э. д. с. этих витков равны по величине и противоположны по знаку, и, следовательно, их сумма будет нулем.

Полезно также заметить, что во всех витках, расположенных

по одну сторону от нейтральной линии, э. д. с. будет иметь один и тот же знак.

Ясно, что соединение обмотки должно быть таким, чтобы э. д. с. складывались, а не вычитались. В кольцевом якоре это требование выполнено, но задача решена весьма неэкономно. Поток распределяется поровну между правым и левым цилиндрами, и, чтобы охватить полностью все магнитные линии, нужно уложить два полных витка, длина которых равна четырехкратной длине якоря.

В барабанных якорях та же самая э. д. с. может быть получена при значительно меньшей (приблизительно вдвое) затрате меди. Уложим провода лишь на внешней поверхности якоря и обдумаем наиболее целесообразный способ их соединения. Свободные выводы, расположенные на одной стороне якоря, назовем началами, а расположенные на другой стороне — концами. Соединив между собой два каких-нибудь начала, мы получим виток, пока еще разомкнутый.

Оказывается, что нельзя соединять между собой соседние провода. Если соединить начало одного провода с концом соседнего, то получится только что рассмотренный кольцевой якорь. Еще хуже соединить между собой начала двух соседних проводов. Такой виток не охватит даже половины магнитного потока, и в нем будет наводиться весьма малая э. д. с.

Правильное решение задачи — соединить между собой начала двух проводов, расстояние между которыми равно примерно половине окружности якоря [1]. Такой виток будет охватывать весь магнитный поток, и в нем будет наводиться э. д. с., вдвое бо́льшая, чем в витке кольцевого якоря. Не только сокращается расход меди, но и уменьшается сопротивление обмотки, а следовательно, и уменьшаются бесполезные потери.

Концы проводов остаются пока свободными. Их надо соединить и с коллектором, иначе машина будет давать переменный, а не постоянный ток, и между собой, так как иначе цепь будет незамкнутой. Таким образом, число сторон обмотки будет вдвое больше числа пластин коллектора. При соединении свободных концов надо руководствоваться тем же правилом, что и при соединении начал: расстояние

[1] Если в машине не одна, а две пары полюсов, то расстояние между соединяемыми проводами равно четверти окружности, при трех парах полюсов — одной шестой части и т. д.

между соединительными концами должно быть приблизительно равным половине окружности якоря. В самом деле, наши обозначения «конец» и «начало» совершенно произвольны, и то, что установлено для «начал», остается верным и для «концов».

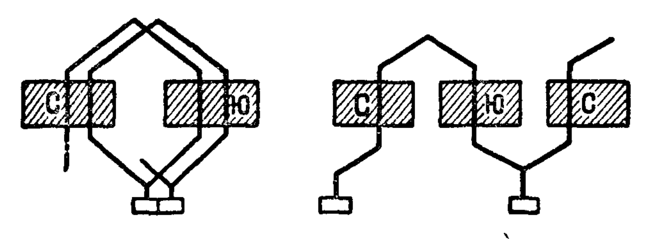


Рис. 10-9. Петлевая (слева) и волновая (справа) обмотки машин постоянного тока.

Однако, если число полюсов больше двух, то этому требованию можно удовлетворить двумя различными способами. Возьмем какой-нибудь незамкнутый виток. Если одна из его сторон лежит под южным полюсом, то другая будет находиться под северным. Конец, находящийся под южным полюсом, должен быть соединен с концом другого витка и притом такого, который находится под северным полюсом.

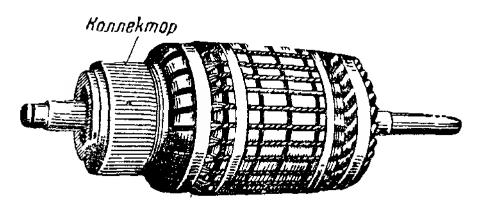


Рис. 10-10. Якорь машины постоянного тока.

Но в многополюсной машине рядом с южным находится не один, а два северных полюса. К какому же именно витку мы должны присоединить наш свободный конец?

Возможны оба решения. Если мы вернемся обратно, т. е. соединим два таких витка, у которых обе стороны лежат под одними и теми же полюсами, то получится петлевая обмотка. Если же мы пойдем не назад, а вперед, и соединим витки, стороны которых лежат под различными полюсами, то получится волновая обмотка (рис. 10-9).

Обмотки укладываются в специальных пазах, вырезанных по поверхности якоря. Внешний вид якоря показан на рис. 10-10.

10-5. РАБОЧИЙ РЕЖИМ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Чем больше магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, чем больше скорость вращения якоря и чем больше проводов в обмотке якоря включено последовательно, тем выше будет напряжение на зажимах генератора.

Меняя ток возбуждения и скорость вращения машины, мы можем тем самым регулировать ее напряжение. Если машина не нагружена, т. е. если в обмотке якоря нет тока, мощность, затрачиваемая на ее вращение, определяется почти исключительно теми незначительными, но неизбежными потерями мощности, которые вызываются наличием трения. Но присоединим к щеткам машины какую-либо замкнутую цепь — в обмотке якоря потечет ток, этот ток будет взаимодействовать с магнитным полем полюсов, препятствуя вращению якоря (убедитесь в этом самостоятельно, пользуясь правилом левой руки и имея в виду, что ток в проводах, изображенных на рис. 10-10, будет протекать в направлении наводимого напряжения). Чем больше будет ток, тем большее усилие нужно прилагать для того, чтобы поддерживать вращение машины, иначе говоря, тем бóльшую механическую мощность нужно затрачивать.

Это понятно: чем больше ток, тем больше мощность, отдаваемая машиной во внешнюю цепь (при неизменном напряжении).

Разберемся в этих вопросах несколько подробнее. Предположим, что величина тока в обмотке возбуждения не меняется и, следовательно, не меняется величина магнитного потока. При этом условии величина э. д. с. якоря будет зависеть лишь от скорости его вращения. В неподвижном якоре она будет равна нулю, в медленно вращающемся якоре она будет мала, с увеличением скорости вращения она будет возрастать. По закону электромагнитной индукции величина наводимой э. д. с. тем больше, чем больше скорость изменения магнитного потока. Если увеличить скорость вращения якоря вдвое, то вдвое возрастет величина э. д. с. Иными словами, отношение э. д. с. якоря к его скорости вращения есть величина постоянная, т. е.

$$\frac{Э}{n} = \text{постоянной},$$

где $Э$ — э. д. с. якоря и n—число его оборотов в минуту.

Теперь предположим, что якорь вращается с какой-то постоянной скоростью, и будем менять величину тока возбуждения, а вместе с ним и величину магнитного потока. Этим меняется скорость изменения магнитного потока. Вспомним, что за четверть оборота двухполюсной машины поток изменяется от нуля до своего наибольшего значения. Среднюю скорость изменения потока мы получим, разделив наибольшую величину потока на время, соответствующее четверти периода. Тут же напомним, что величина наводимой э. д. с. равна скорости изменения потока. В итоге получается, что при постоянстве скорости вращения э. д. с. якоря пропорциональна величине магнитного потока, т. е.

$$\frac{Э}{Ф} = \text{постоянной}.$$

Что же произойдет, если мы будем одновременно менять и скорость вращения и величину магнитного потока, но так, чтобы их произведение оставалось неизменным? В этом случае э. д. с. якоря меняться не будет. В самом деле, если, не меняя потока, увеличить втрое скорость вращения, то э. д. с. увеличится также втрое. Если затем уменьшить втрое величину потока (обратите внимание, что произведение $Ф \ n$ в результате не изменилось), то величина э. д. с, уменьшившись втрое, примет свою первоначальную величину. Это приводит нас к очень важному соотношеиию

$$\frac{Э}{Ф \cdot n} = \text{постоянной},$$

которое нам неоднократно встретится в дальнейшем.

Для оценки механической мощности, развиваемой электрической машиной, удобнее всего исходить из величины момента силы. Напомним, что моментом силы называется произведение силы на плечо. Плечом в данном случае является радиус якоря; так как радиус якоря является постоянной величиной, то момент пропорционален той силе, с которой магнитное поле машины действует на протекающие по якорю токи. Сила, действующая на один провод, нам известна (§ 3-5): она равна произведению $I \ l \cdot B$ (*ток×длина провода×магнитная индукция*). Сила, действующая на обмотку в целом, будет соответственно больше.

Нас интересует не величина момента, а то, как он будет изменяться в зависимости от магнитного потока машины

и нагрузочного тока Увеличив или уменьшив магнитный поток, мы увеличим или уменьшим и притом во столько же раз величину магнитной индукции. Соответственно изменится и величина развиваемого машиной момента. Обозначив его через M, мы можем записать:

$$\frac{M}{\Phi \cdot I} = \text{постоянной.}$$

Отметим, что в нагруженной машине картина усложняется, так как ток якоря создает свое собственное магнитное поле, которое складывается с магнитным полем тока возбуждения. На рис. 10-11 направление магнитного поля якоря показано двумя стрелками. Останавливаться на

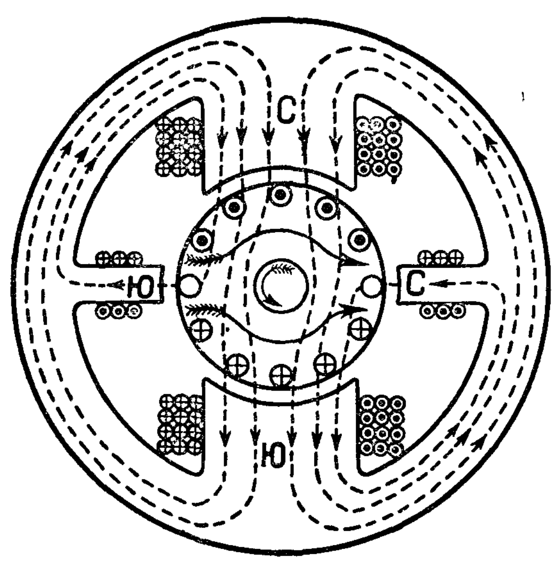


Рис. 10-11. Добавочные полюсы в генераторе постоянного тока.

подробностях этого явления мы не будем. Укажем лишь, что результатом этого искажения поля является смещение нейтральной линии. Неприятным следствием является то, что коллекторные пластины будут находиться под щетками в тот момент, когда э. д. с. соответствующих витков не будет равна нулю, а это затрудняет операцию выпрямления тока.

Для борьбы с этим явлением применяют один из двух следующих способов. Или смещают щетки, выбирая их место так, чтобы те переключения, о которых мы говорили в § 10-4, происходили при отсутствии э. д. с. в витках, концы которых пересоединяются в данный момент времени. Или искусственно создают такое магнитное поле, которое уничтожало бы магнитное поле якоря. Это достигается установкой так называемых добавочных полюсов. Магнитная система машины с добавочными полюсами показана на рис. 10-11.

10-6. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИН

Для того чтобы создать магнитное поле, или, как говорят, возбудить машину, нужно пропустить ток через обмотку возбуждения. Для этой цели можно использовать какой-нибудь посторонний источник постоянного тока, но этот способ применяется редко. Бóльшая часть машин работает с самовозбуждением, и ток в обмотку возбуждения поступает из самой машины. В первом случае цепи обмоток возбуждения и якоря не соединены между собой, во втором — соединяются. Чаще всего встречается параллельное или последовательное соединение, а иногда и более сложное.

На первый взгляд здесь имеется противоречие. Ведь если машина не возбуждена, то в якоре не может возникнуть ни э. д. с., ни ток. Спрашивается, каким же образом машина может вызвать появление тока в обмотке возбуждения?

Вспомним, что однажды намагниченное железо сохраняет магнитные свойства и после того, как исчез намагничивающий ток. Сердечники, на которых расположены обмотки возбуждения, являются постоянными магнитами, хотя и очень слабыми. Начнем вращать якорь. В его обмотке появится незначительная э. д. с., а так как якорь соединен с обмоткой возбуждения, то в последней возникает незначительный ток.

Но как бы слаб ни был ток возбуждения, он создаст вокруг себя магнитное поле. Если направление вращения выбрано правильно, то это магнитное поле усилит поле, существовавшее ранее, э. д. с. якоря возрастет, а вместе с ней будет возрастать и ток возбуждения. Такими последовательными ступенями мы доведем ток до его расчетного значения.

Однако, если направление вращения выбрано ошибочно, самовозбуждение наступить не может, так как э. д. с. якоря будет ослаблять то поле, которое существовало благодаря остаточному намагничиванию. В этом случае необходимо переключить концы обмоток возбуждения.

Обмотку возбуждения можно присоединить последовательно с потребителем к щеткам машины (рис. 10-12) — последовательное возбуждение (или сериесное). Можно

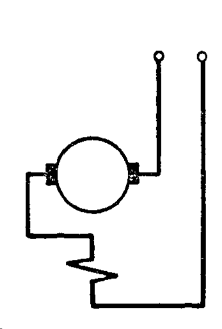


Рис. 10-12. Машина с последовательным возбуждением.

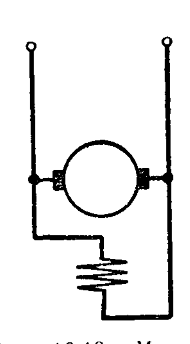


Рис. 10-13. Машина с параллельным возбуждением.

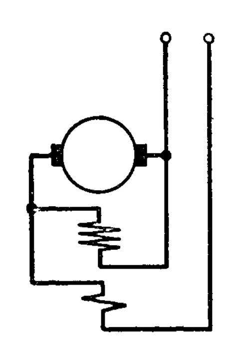


Рис. 10-14. Машина со смешанным возбуждением.

включить обмотку возбуждения и параллельно с потребителем (рис. 10-13) — параллельное возбуждение (или шунтовое).

Наконец, возможно устроить и смешанное возбуждение, поместив на полюсах две обмотки возбуждения и соединив их с якорем — одну параллельно, а другую последовательно (рис. 10-14).

Рассмотрим, как будет изменяться величина напряжения генератора в зависимости от нагрузки. Напомним, что напряжение генератора меньше его э. д. с. на величину падения напряжения внутри машины (§ 2-7). Падение напряжения определяется по закону Ома: оно равно произведению тока в якоре и его внутреннего сопротивления:

$$U = Э - I \cdot r.$$

В генераторах с параллельным возбуждением под r надо понимать сумму сопротивлений обмотки якоря, обмотки добавочных полюсов и переходного контакта щеток; в генераторах с последовательным и со смешанным

возбуждением в r должно быть еще сопротивление последовательной обмотки возбуждения.

Задача оказывается более сложной, чем это может показаться с первого взгляда. Дело в том, что даже при постоянстве скорости вращения генератора величина его э. д. с. не будет оставаться постоянной, а будет зависеть от тока нагрузки. Так, например, из нашей формулы следует, что в генераторах параллельного возбуждения появление тока в якоре вызовет уменьшение напряжения по сравнению с тем, что наблюдалось при холостом ходе машин. Но дело этим не ограничивается. Напряжение на концах обмотки возбуждения также равно величине U и, снизив ее, мы уменьшим величину тока возбуждения, а следовательно, и магнитного потока и э. д. с. якоря. Мы видим, что колебания напряжения не равны величине $I \cdot r$, а больше ее. Поэтому всегда приходится предусматривать добавочное сопротивление в цепи обмотки возбуждения. Изменяя величину этого сопротивления, мы можем сохранять напряжение постоянным.

Иначе обстоит дело в генераторах последовательного возбуждения. При отсутствии нагрузки его э. д. с. почти равна нулю, так как машина не возбуждена. С увеличением тока растут оба члена в правой части нашей формулы. Растет и их разность, т. е. напряжение, но лишь до известного предела. Отметим, что генераторы с последовательным возбуждением встречаются на практике крайне редко.

Генератор со смешанным возбуждением является одновременно генератором и с параллельным и с последовательным возбуждением. Нагрузочный ток стремится и снизить напряжение и увеличить его. Можно добиться такого положения вещей, чтобы изменение нагрузки почти не влияло на величину напряжения генератора.

10-7. ОБРАТИМОСТЬ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА. РАБОТА ДВИГАТЕЛЯ

Всякая машина постоянного тока может работать и генератором и двигателем. Присоединим машину с параллельным возбуждением к сети постоянного тока. Соединим щетку + с положительным полюсом сети, а щетку — с отрицательным полюсом. В якоре нашей машины потечет ток, имеющий направление, прямо противоположное току, протекающему в якоре, когда машина работала генератором. Направление тока в обмотке возбуждения сохранит

прежнее направление. Применяя правило левой руки, или правило штопора, можно определить направление силы, действующей теперь на якорь.

Эта сила будет стремиться вращать якорь в ту же сторону, в которую он вращался при работе машины генератором. Об этом можно было бы догадаться и непосредственно: в самом деле, ток теперь течет в другом направлении, чем когда машина работала генератором, а при работе генератором взаимодействие тока и магнитного поля препятствовало вращению якоря.

Итак, когда мы машину постоянного тока приключим к сети, в ней потечет ток, и она будет вращаться.

Но с какой скоростью она будет вращаться и чему будет равен ток, протекающий через нее? Попробуем найти ответ и на эти вопросы.

Если бы якорь машины был неподвижен, например наглухо заторможен, ток, протекающий через якорь, был бы чрезвычайно велик. Для того чтобы его подсчитать, можно воспользоваться законом Ома: приложенное к якорю напряжение нужно разделить на внутреннее сопротивление цепи якоря. Так как это сопротивление невелико, то ток в ней будет очень небольшим. Напротив, в обмотке возбуждения шунтовой машины ток будет не больше нормальной величины: ее сопротивление неизменно, а на полное напряжение сети она включается и при нормальной работе.

Освободим теперь якорь и дадим ему возможность вращаться. В обмотке вращающегося якоря немедленно начнет наводиться напряжение, при этом тем большее, чем больше будет скорость его вращения. Это напряжение будет направлено навстречу приложенному извне напряжению. Оно будет стремиться посылать ток в обратном направлении (вспомните, что вращение происходит в том же направлении, что и вращение генератора).

Таким образом, в обмотке машины будет действовать разность напряжений: приложенного извне и наводимого в самой обмотке (противодействующая э. д. с.). Если эту разность разделить на электрическое сопротивление машины, то получится ток, протекающий в машине.

Чем больше будет величина наведенного напряжения, чем больше будет скорость вращения двигателя с параллельным возбуждением, тем, очевидно, будет меньше разность внешнего и наводимого напряжений, а следовательно, тем меньше будет ток, текущий через обмотку якоря.

Но меньшему току соответствует и меньшее вращающее усилие.

Поэтому естественно, что чем слабее механическая нагрузка двигателя (чем меньше ее тормозящее усилие), тем скорее будет вращаться якорь, тем меньший ток будет идти в машину из сети, тем меньшая мощность будет потребляться двигателем.

Посмотрим теперь, как машину постоянного тока можно перевести из условий работы двигателем в условия работы генератором.

Пусть наш двигатель присоединен к сети и не имеет никакой механической нагрузки, т. е. пусть двигатель работает вхолостую. Скорость вращения при этом будет такой, что наводимое напряжение будет очень мало отличаться от напряжения сети. В обмотке якоря будет протекать очень малый ток, нужный только для того, чтобы создать усилие, преодолевающее трение в самой машине. Будем раскручивать нашу машину, заставим ее делать еще большее число оборотов в минуту. Что при этом произойдет? Напряжение, наводимое в якоре, может оказаться уже больше напряжения сети, тогда ток изменит направление. Ток будет протекать по направлению, определяемому напряжением, наводимым в якоре. Теперь снова его взаимодействие с магнитным полем будет тормозить, будет препятствовать вращению якоря.

Для вращения якоря теперь нужно затрачивать механическую мощность; ток течет в направлении, определяемом напряжением, наводимым в якоре, и, следовательно, наша машина начала работать генератором.

10-8. ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Основным различием между режимами генератора и двигателя является то, что в первом случае напряжение представляет собой часть э. д. с. якоря, а во втором случае имеет место обратная картина. Напряжение двигателя равно напряжению той сети, к которой он присоединен. Часть этого напряжения уравновешивается падением напряжения в цепи якоря (в двигателях с последовательным возбуждением в цепях якоря и возбуждения). Другая часть уравновешивается той э. д. с., которая возникает в обмотке якоря в результате его вращения. Поэтому для двигателей должно выполняться соотношение

$$U = Э + I \cdot r.$$

В сущности это та же самая формула, которую мы получили, рассматривая работу машины генератором (стр. 334). Но так как при переходе от генераторного режима к режиму двигателя ток в якоре изменил свое направление, то в формуле пришлось изменить знак перед величиной тока.

Если присоединить к сети неподвижный двигатель, то в первый момент э. д. с. будет отсутствовать, и напряжение сети будет уравновешиваться лишь падением напряжения в цепи якоря. Появится так называемый пусковой ток, величина которого находится по закону Ома

$$I_{(\text{пуск})} = \frac{U}{r}$$

и намного превосходит нормальный рабочий ток двигателя. Поэтому двигатели постоянного тока приходится снабжать пусковыми реостатами, назначение которых снизить пусковой ток до безопасной величины. Схема включения пускового реостата в цепь двигателя с параллельным возбуждением показана на рис. 10-15. Ручка реостата соединяет точки *Л* (линия) и *Я* (якорь) сначала через большое сопротивление, а потом по мере появления э. д. с. в якорной обмотке через меньшее. Нормально двигатель работает при положении ручки в точке *Я*. Одновременно ручка скользит по пластине *М*, соединенной с цепью возбуждения. Благодаря этому обмотка возбуждения сразу оказывается под полным напряжением сети (с этой целью ручку реостата возбуждения надо перевести в крайнее левое положение), и момент, развиваемый двигателем, оказывается наибольшим.

Подобным образом происходит пуск двигателя с последовательным возбуждением, но устройство пускового реостата несколько проще, так как нет надобности в пластине *М* (рис. 10-16).

Отметим теперь некоторые особенности работы рассмотренных двигателей.

Магнитный поток в двигателе с параллельным возбуждением остается приблизительно постоянным, поэтому с уменьшением нагрузки скорость вращения двигателя будет возрастать не очень резко. Действительно, при холостом ходе напряжение, индуктируемое в якоре, должно достичь величины, приблизительно равной напряжению сети. Но это напряжение для данной машины пропорционально произведению магнитного потока Ф на скорость

вращения двигателя n, а так как поток почти не меняется с нагрузкой, т. е. остается достаточно большим, то достаточно ненамного увеличить скорость вращения, чтобы уже достичь требуемой величины э. д. с.

В двигателе с параллельным возбуждением поток остается приблизительно постоянным независимо от величины нагрузки (потому что обмотка напряжения включена прямо на напряжение сети, остающееся приблизительно неизменным). Поэтому можно считать, что ток

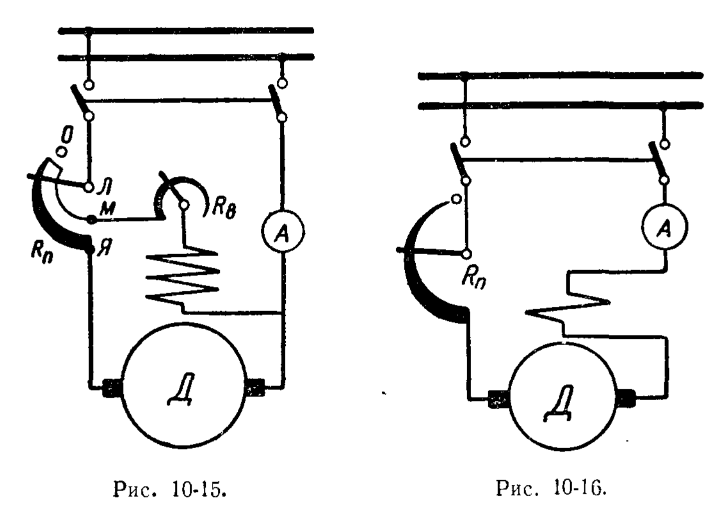


Рис. 10-15. Рис. 10-16.

десь будет прямо пропорционален тормозящему моменту.

Двигатели с параллельным возбуждением представляют собой машину, очень удобную в отношении возможности регулировать скорость их вращения. Действительно, пусть, например, наша машина работает с неизменной мощностью, а это значит, что величина тока, одводимого к якорю, также должна оставаться приблизиельно постоянной. Но для того чтобы иметь неизменный ок, нужно, чтобы оставалась неизменной и величина напряжения, наводимого в якоре.

Уменьшим теперь ток возбуждения, вводя, например, ополнительное сопротивление между зажимами сети и обмоткой возбуждения.

Вследствие уменьшения тока возбуждения уменьшится и магнитный поток, а это значит, что должна увели-

читься скорость вращения машины: э. д. с. якоря не изменилась и, следовательно, не может измениться произведение $Ф \cdot n$.

Рассуждая совершенно таким же способом, мы найдем, что для уменьшения скорости вращения машины при одной и той же мощности нужно увеличить магнитный поток, иначе говоря, нужно увеличить ток возбуждения.

Если слишком сильно уменьшить ток возбуждения или вовсе разорвать цепь возбуждения, двигатель с параллельным возбуждением начнет вращаться с недопустимо большой скоростью, он, как говорят, идет на разнос. Эти двигатели «боятся» обрыва цепи возбуждения.

Для двигателей с последовательным возбуждеиием остаются справедливыми все приведенные в § 10-6 формулы. Но применяя их к двигателю с последовательным возбуждением, мы увидим, что он имеет совершенно другие характеристики.

Пусть, например, мы будем уменьшать тормозящее усилие приложенной к двигателю нагрузки. Должен, разумеется, уменьшиться ток, следовательно, должно увеличиться и напряжение, наводимое в якоре машины.

Но вместе с уменьшением тока в двигателе будет уменьшаться и магнитный поток. Ведь в этом случае (рис. 10-12) ток якоря является и током возбуждения.

Это в свою очередь затрудняет наведение необходимого напряжения. Скорость вращения двигателя с последовательным возбуждением с уменьшением механической нагрузки будет значительно сильнее возрастать, чем в двигателе с параллельным возбуждением; произведение $Ф \cdot n$ должно возрасти, в то же время множитель Ф при этом будет уменьшаться, значит, второй множитель n должен возрастать более резко.

Подобно тому как двигатель с параллельным возбуждением идет на разнос при обрыве цепи возбуждения, двигатель с последовательным возбуждением идет на разнос, если он оставлен без нагрузки (и если последовательно с ним не включено дополнительное сопротивление, достаточно большое, чтобы ограничить нарастающий ток).

Напротив, при увеличении нагрузки двигатель с последовательным возбуждением будет более резко снижать скорость вращения, так как вместе с ростом тока в нем растет и величина магнитного потока. Но зато двигатель будет значительно увеличивать вращающее усилие. Дей-

ствительно, момент двигателя пропорционален произведению тока и магнитного тока, а в двигателе с последовательным возбуждением вместе с током (при увеличении нагрузки) будет расти и поток.

Сказанное здесь о двигателе с последовательным возбуждением делает понятным, почему эти двигатели оказываются очень удобными для электрической тяги: там они никогда не могут остаться без нагрузки, это — первое, а второе и главное — это то, что для целей транспорта очень важно, чтобы при трогании с места и при малой скорости вращения двигатель развивал достаточно большое вращающее усилие.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

11-1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

До сих пор мы не касались вопроса о том, как получаются напряжения, достаточно высокие для питания линий передач. Генераторы вроде показанного на рис. 6-1 не годятся для этой цели, так как при наличии вращающихся частей трудно обеспечить надежную изоляцию находящихся под высоким напряжением проводников. Рабочее напряжение современных крупных генераторов чаще всего бывает равным 6 300, 10 500, 13 800 или 15 750 *в*, более высокие напряжения встречаются крайне редко. Возникает ответственная задача — преобразовать вырабатываемую генератором электромагнитную энергию в электромагнитную же энергию, но при более высоком напряжении. Простейшим решением этой задачи является применение трансформаторов.

Впервые трансформаторы переменного тока получили промышленное применение в установках со свечами Яблочкова. Эти трансформаторы были изобретены П. Н. Яблочковым.

Возьмем один виток проволоки и присоединим его к источнику переменного напряжения. Возникший в витке ток создаст вокруг себя магнитное поле. Мы можем распорядиться направлением линий этого поля по нашему усмотрению, создав для них стальной магнитопровод. Ничтожное число магнитных линий, замыкающихся поми-

мо стали в воздухе, можно не принимать во внимание. Получится показанная на рис. 11-1 схема.

Добавим еще один виток, расположив его так, чтобы он полностью охватывал магнитный поток стального сердечника, и изолируем его от первого витка. Оба витка будут вполне самостоятельными электрическими цепями. Связь между ними осуществляется исключительно магнитным полем.

Всякое изменение тока в первом витке вызовет изменение магнитного потока. Закон электромагнитной индукции утверждает, что изменение магнитного потока обусловливает появление индуктированного напряжения. Это справедливо как для первого витка, так и для второго, ибо они пронизываются одним и тем же магнитным потоком. Очевидно, что и направление индуктированного напряжения будет одинаковым в обоих витках.

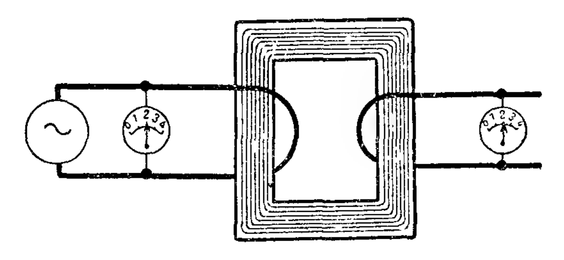


Рис. 11-1. Первичная и вторичная обмотки трансформатора имеют по одному витку. Напряжения на концах обеих обмоток одинаковы.

Осуществить изменение величины тока в первом витке можно самыми различными способами. В схеме рис. 3-31 мы добивались этого размыканием и замыканием рубильника. Здесь мы питаем первый виток от генератора переменного напряжения, получая, таким образом, переменный ток и переменный магнитный поток.

Обратимся ко второму правилу Кирхгофа. Напряжение генератора (его э. д. с.) должно быть уравновешено напряжением в цепи. В нашей цепи падение напряжения обусловлено двумя причинами; во-первых, наличием сопротивления у витка и, во-вторых, изменением магнитного потока, т. е. появлением э. д. с. самоиндукции. Влияние сопротивления витка невелико, и падение напряжения, вызванное им, составит незначительную часть генераторного

напряжения[1]. Таким образом, напряжение генератора почти полностью уравновесится напряжением, наведенным в первом витке.

Что же будет происходить во втором витке? Попытаемся применить и к нему второе правило Кирхгофа. Цепь, правда, не замкнута, но это — не препятствие к применению правила Кирхгофа, а лишь осложнение.

Мы знаем, что наведенное во втором витке напряжение немногим отличается от генераторного. Спрашивается, чем оно будет уравновешено. Тока в цепи нет: она разомкнута. Но на концах витка, на его зажимах, будет существовать напряжение, в точности равное наведенному.

Напрашивается сравнение между вторым витком нашей схемы и холостым ходом генератора или даже аккумуляторной батареи, к которой не присоединено никакой нагрузки. Оба эти случая характеризуются тем, что на концах разомкнутой цепи мы имеем напряжение (э. д. с.). Присоединив к свободным концам какую-нибудь нагрузку и замкнув тем самым цепь, мы получаем ток, а следовательно, и потребление энергии. Что же получится в этом случае?

Прежде чем ответить на этот вопрос, обратим внимание на ту двойственную роль, которую играет в нашей схеме наведенное напряжение. В первом витке, т. е. в цепи, где находится источник энергии, наведенное магнитным потоком напряжение выполняет примерно ту же роль, что и сопротивление, — препятствует протеканию тока в цепи. Прямо противоположную картину мы имеем во втором витке: там напряжение, наведенное тем же самым магнитным потоком, является уже не сопротивлением в цепи источника напряжения, а источником напряжения, к которому можно присоединять нагрузку. Попутно отметим, что величина напряжения в обоих витках оказывается одинаковой.

А теперь замкнем второй виток хотя бы через лампу накаливания, рабочее напряжение которой соответствует напряжению между разомкнутыми концами витка. Опыт показывает, что она будет гореть. Сейчас же возникает вопрос, откуда взялась необходимая для ее горения энергия?

---

[1] Таким образом, присоединив трансформатор к источнику постоянного напряжения, мы получим картину, близкую к короткому замыканию. Напряжение источника должно уравновешиваться падением напряжения в ничтожно малом сопротивлении витка, а это возможно лишь при наличии громадных токов.

Единственным источником энергии является генератор. Но, во-первых, он находится в другой электрической цепи, а во-вторых, непонятно, почему он стал отдавать энергию именно после того, как мы подключили нагрузку (лампу).

Генератор, который, быть может, находится вдали и от стального сердечника и от лампы, «узнал», что мы замкнули цепь второго витка, «подсчитал», какая именно мощность нам требуется (лампу можно взять и на 50 *вт* и на 100 *вт*), и каким-то непонятным образом начал снабжать нас энергией в требуемых количествах.

Все это объясняется чрезвычайно просто:

> *ток в цепи второго витка создал свое магнитное поле,*

которое налагается на магнитное поле тока первого витка. Мы знаем, что здесь возможны два случая: либо второе поле усилит первое, либо, наоборот, ослабит его. Вопрос этот решается в зависимости от того, как направлены оба тока.

Оба тока переменные, т. е. их направление меняется каждые полпериода. Поэтому сравнивать между собой их направления можно лишь для какого-то пусть произвольного, но все же одного и того же момента времени.

В лампах нет сдвига фаз между током и напряжением, а сопротивление витка (сейчас нас интересует второй виток) значительно меньше сопротивления лампы. Если бы второй виток является генератором, то мы сказали бы, что ток лампы находится в фазе с генераторным напряжением. Применительно к нашей схеме мы скажем, что ток лампы находится в фазе, стало быть, одинаково направлен с тем напряжением, которое наведено во втором витке первоначальным магнитным потоком.

Но это же самое напряжение наведено и в первом витке, и направление его таково, что оно препятствует протеканию тока.

> *Одно и то же напряжение является причиной появления тока во втором витке и помехой для протекания тока в первом витке.*

Значит, токи обоих витков имеют разные направления (если не в течение всего периода, то на протяжении большей его части). Отсюда чрезвычайно важный вывод:

> *нагрузочный ток второго витка стремится размагничивать железный сердечник.*

Но попытка уменьшить магнитный поток будет пресекаться увеличением тока в первом витке. Действительно, если магнитный поток уменьшится, уменьшится напряжение самоиндукции и доля напряжения генератора, уравновешиваемая падением напряжения в омическом сопротивлении первой обмотки, должна возрасти. А это значит, что должен возрасти ток. Но если ток начнет возрастать, начнет возрастать и магнитный поток. В итоге в трансформаторе устанавливается равновесие намагничивающего действия первичной обмотки и размагничивающего дей-

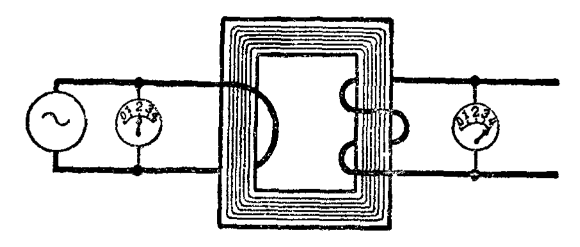


Рис. 11-2. Первичная обмотка трансформатора имеет один виток, вторичная—два витка. Напряжение на концах вторичной обмотки вдвое больше, чем в первичной.

ствия вторичной, — магнитный поток будет поддерживаться на уровне, приблизительно соответствующем холостому ходу, т. е. разомкнутому второму витку.

Итак, мы решили задачу передачи энергии из цепи в цепь, но от нас требуется уменье повышать напряжение. С этой целью заменим второй виток схемы рис. 11-1 обмоткой из двух витков, как это показано на рис. 11-2.

Все наши рассуждения, примененные к одному витку старой схемы, остаются справедливыми для каждого из двух витков вторичной цепи новой схемы. Витки соединены последовательно, и их напряжения сложатся. На свободных концах получается напряжение, вдвое большее, чем то, которым обладает каждый из витков в отдельности, и вдвое больше, чем мы имеем на генераторной (первичной) стороне. Задача повышения напряжения решена.

Добавим на первичной стороне еще один виток. Обе обмотки, и первичная и вторичная, будут состоять из двух витков каждая. Схематически это изображено на рис. 11-3.

Генераторное напряжение распределится поровну между обоими витками первичной обмотки. Напряжение, приходящееся на каждый виток, будет вдвое меньше, чем в схемах рис. 11-1 и 11-2.

Следовательно, чтобы добиться равновесия, надо иметь в каждом витке вдвое меньшее индуктированное напряжение. Общая же величина индуктированного в обоих витках напряжения будет той же, что и в предыдущих схемах.

Оба витка пронизываются одним и тем же магнитным потоком. Так как каждый виток требует половинного зна-

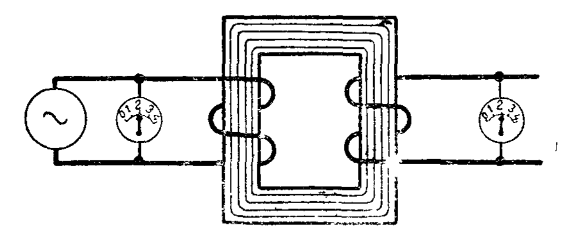


Рис. 11-3. Первичная и вторичная обмотки трансформатора имеют по два витка. Обмотки имеют одинаковое напряжение. Магнитный поток оказался вдвое меньше, чем в трансформаторе рис. 11-1 и 11-2.

чения индуктированного напряжения, то в железном сердечнике возникает магнитный поток, в 2 раза меньший, чем в тех схемах, где первичная обмотка состояла из одного витка. Это обстоятельство чрезвычайно важно, так как оно позволяет задавать нам по нашему выбору значения магнитной индукции в трансформаторе. В самом деле, увеличивая число витков в первичной обмотке, мы уменьшаем величину магнитного потока, а следовательно, и магнитной индукции. Этот способ уменьшения магнитной индукции может оказаться выгоднее, чем увеличение сечения сердечника. Магнитную индукцию мы назначаем с таким расчетом, чтобы не допустить чрезмерных потерь в стали (§ 11-4). В результате к. п. д. (отдача) современных крупных трансформаторов чрезвычайно высок, превышая иногда 99% (теряется менее 1% передаваемой мощности).

Теперь посмотрим, что будет происходить во вторичной обмотке. В каждом ее витке будет индуктироваться напряжение, равное напряжению одного витка первичной обмот-

ки. Число витков в обеих обмотках одинаково. Одинаковыми будут первичное и вторичное напряжения.

Удалим один виток из вторичной обмотки. Получится схема, показанная на рис. 11-4 и отличающаяся от схемы рис. 11-2 лишь тем, что генератор и нагрузка поменялись местами.

Явления в первичной обмотке ничем не будут отличаться от того, что мы имели в предыдущей схеме, но на концах вторичной обмотки мы получим половинное напряжение. Вместо того чтобы повысить напряжение, трансформатор понизил его.

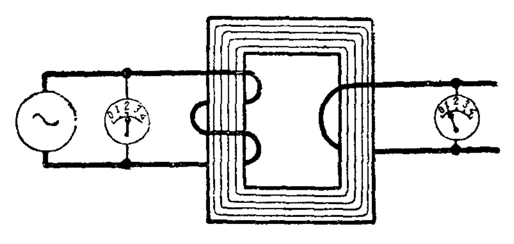


Рис. 11-4. Первичная обмотка трансформатора имеет два витка, вторичная—один виток. Напряжение на концах вторичной обмотки вдвое меньше, чем на первичной.

Способность трансформатора понижать напряжение используется очень широко. Напряжение на приемном конце линии передачи может составлять и 100 и 200 *кв*. К источнику столь высокого напряжения нельзя присоединить ни двигателей, ни ламп. Надо позаботиться о его снижении.

Подведем итог всем нашим рассуждениям. Необходимое для передачи энергии преобразование напряжения может осуществляться лишь при помощи переменного тока. Постоянный ток непригоден для этой цели, так как он создает постоянный магнитный поток, который не индуктирует необходимого напряжения. Это преимущество переменного тока перед постоянным настолько важно, что мы, хотя и неохотно, но все же миримся с присущими переменному току недостатками вроде сдвига фаз между напряжением и током.

Любой виток обеих трансформаторных обмоток имеет одно и то же напряжение. Отношение числа витков (оно также называется коэффициентом трансформации) будет в то же время отношением напряжений обмоток. Если число витков первичной обмотки меньше

числа витков вторичной обмотки, то трансформатор будет **повышающим**. В **понижающем** трансформаторе первичная обмотка имеет большее количество витков.

Забираемая из генератора энергия почти полностью передается во вторичную цепь. Если не считаться с наличием потерь в трансформаторе, то можно приравнять друг другу мощности первичной и вторичной цепей. Отсюда мы сделаем тот вывод, что понижение трансформатором напряжения приводит к соответственному увеличению тока, и наоборот (стр. 246).

11-2. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА

Если поддерживать неизменным действующее значение первичного напряжения трансформатора, то величина вторичного напряжения будет меняться в зависимости от нагрузки. При холостом ходе, т. е. при разомкнутых вторичных зажимах, напряжение вторичной обмотки будет равно наводимой в ней э. д. с. При нагруженном трансформаторе напряжение вторичной обмотки будет меньше э. д. с., так как имеет место падение напряжения не только во вторичной, но и в первичной обмотке трансформатора.

В первичной обмотке величина э. д. с. меньше напряжения на зажимах на величину того падения напряжения, которое создается протекающим по ней током. Трансформации же подвергается не напряжение, а э. д. с. Следовательно, в результате увеличения нагрузки, т. е. тока, появляются две причины для уменьшения вторичного напряжения. Во-первых, уменьшается э. д. с. первичной обмотки и пропорционально ей уменьшается величина вторичной э. д. с. Во-вторых, уменьшается та доля вторичной э. д. с., которая уравновешивается вторичным напряжением.

Передача энергии производится, например, по схеме рис. 11-5. Генератор, напряжение на зажимах которого составляет 6 300 *в*, присоединен к первичной обмотке повышающего трансформатора. Напряжение на концах вторичной обмотки составляет 110 *кв*. При этом напряжении происходит передача энергии вдоль линии передачи. Передаваемая мощность пусть составляет 10 000 *квт*, сдвиг фаз между током и напряжением отсутствует.

Если наводимое в каждом витке напряжение составляет 3 *в*, то первичная обмотка должна состоять из $\frac{6\,300\ в}{3\ в} = 2\,100$ витков, вторичная же из $\frac{110\,000\ в}{3\ в} = 36\,667$

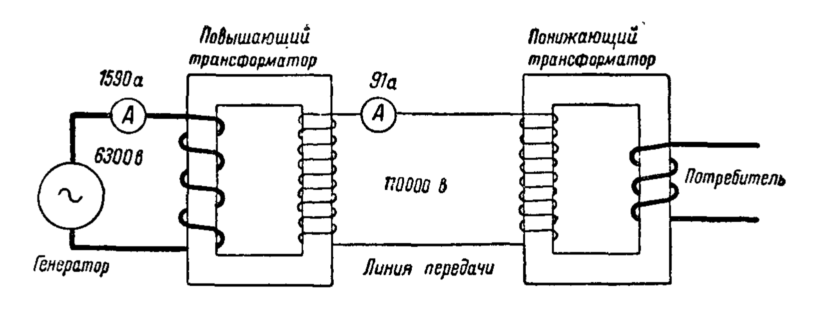


Рис. 11-5. Схема передачи электрической энергии.

витков. Так как мощности в обеих обмотках одинаковы, то ток в первичной обмотке равен:

$$\frac{\textit{мощность}}{\textit{напряжение}}=\frac{10\,000\ \textit{квт}}{6{,}3\ \textit{кв}}=1\,590\ a,$$

а во вторичной обмотке

$$\frac{10\,000\ \textit{квт}}{110\ \textit{кв}}=91\ a.$$

Ту же величину будет иметь ток в проводах линии передачи. Линия заканчивается понижающим трансформатором, вторичная обмотка которого питает потребителя.

11-3. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Для трансформации (преобразования) трехфазного напряжения могут быть применены три отдельных однофазных трансформатора, обмотки которых соединяются в звезду или в треугольник. Но может быть применен и один трехфазный трансформатор, имеющий три стержня, на каждом из которых насажены обмотки низкого и высокого напряжений соответственно первой, второй и третьей фаз.

Такой трехфазный трансформатор схематически показан на рис. 11-6.

На чертеже показано соединение и первичной и вторичной обмоток в звезду.

Подобно токам при соединении в звезду в этом трансформаторе магнитный поток, идущий по одному стержню, замыкается через два других, сцепляясь при этом с двумя другими обмотками.

В трехфазной линии для каждого момента времени

сумма двух токов равна третьему току с обратным знаком (поэтому сумма всех трех токов всегда равна нулю). Точно так же сумма магнитных потоков, идущих через два стержня, всегда равна магнитному потоку третьего

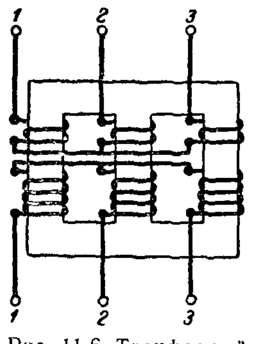


Рис. 11-6. Трехфазный трансформатор.

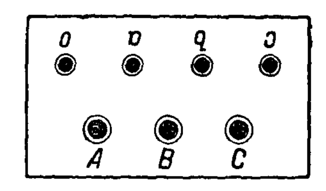


Рис. 11-7. Разметка зажимов трехфазного трансформатора.

стержня с обратным знаком. Это дает возможность магнитным потокам каждого из стержней замыкаться через два других стержня.

Число концов обмоток трехфазного трансформатора равно 12. Однако в трансформаторах, изготовляемых на заводах, наружу выводятся три конца обмотки высокого

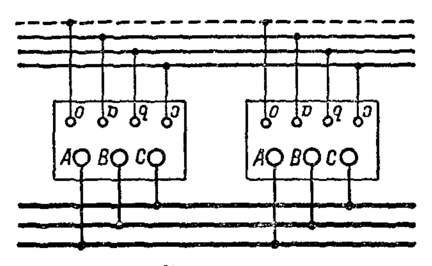


Рис. 11-8

напряжения и три или четыре конца обмотки низкого напряжения (четвертый конец — нейтральная точка звезды).

Выводы высокого напряжения обозначаются прописными (большими) буквами *A*, *B*, *C*. Выводы низкого напряжения — теми же буквами, но строчными (маленькими), т. е. *a*, *b*, *c*. Нейтральная (нулевая) точка обозначается буквой *O*. Одинаковые буквы соответствуют одинаковым фазам, т. е. обмоткам, намотанным на один и тот же стержень

Примерный вид выводов обмоток трехфазного трансформатора показан на рис. 11-7.

Если мощность трансформатора оказывается недостаточной, то параллельно ему можно включить еще один трансформатор. Схема параллельного включения показана на рис. 11-8.

При параллельной работе трансформаторов объединяются их одноименные выводы.

Однако надо помнить, что не каждые два трансформатора могут работать параллельно.

11-4. ПОТЕРИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

Говоря о работе трансформатора, мы почти не касались явлений, происходящих в его стальном сердечнике. Мы считались лишь с тем, что магнитная проницаемость стали весьма велика, благодаря чему все линии магнитного потока замкнулись в стали.

Сопоставим теперь два факта: во-первых, сталь является проводником электрического тока и, во-вторых, в стали существует переменный магнитный поток.

На первый взгляд между ними нельзя установить никакой связи, но, продумав внимательным образом закон электромагнитной индукции, мы убедимся, что это не так, что следствием этих фактов будет появление электрического тока в стали.

Всякое изменение магнитного потока внутри какого-нибудь замкнутого контура индуктирует в нем напряжение. Если этим замкнутым контуром является проводниковая цепь, то в ней появится ток.

Что же будет происходить в контуре, показанном пунктирной линией на рис. 11-9?

Чертеж представляет сердечник трансформатора. Обмотка снята с него, чтобы не усложнять чертежа. Чтобы мы имели возможность заглянуть «внутрь» стали, сплошной магнитопровод показан разрезанным.

Линии переменного магнитного потока замыкаются внутри стали. Часть линий пронизывает наш контур. Налицо изменение магнитного потока в контуре, а следовательно, и индуктированное напряжение.

А так как сталь является проводником, то в ней должны протекать электрические токи.

Здесь несомненная трудность для начинающего. Трудность эта объясняется тем, что в нас глубоко сидит при-

вычка представлять себе электрические токи идущими лишь по тонким длинным проводникам. Верно, что электротехник старается направлять путь тока по проводам, но ведь токи зачастую появляются помимо нашего желания, выбирая себе наиболее удобные пути.

Попытаемся обратиться к нашим привычным представлениям. Вообразим, что сердечник сделан из какого-то

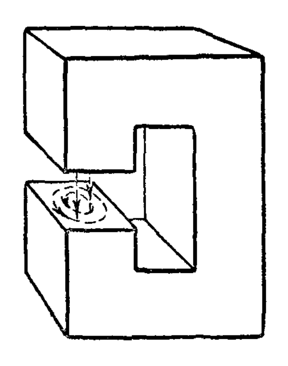


Рис. 11-9.

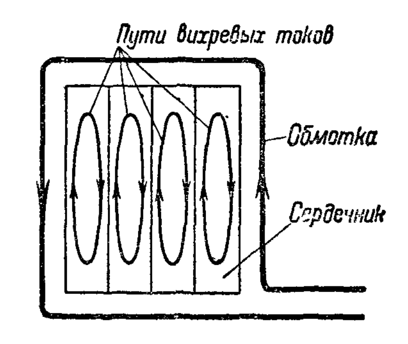


Рис. 11-10. Расслаивая сердечник на изолированные друг от друга стальные листы, мы уменьшим потери от вихревых токов.

материала, который, с одной стороны, обладает такой же магнитной проницаемостью, как и сталь, а с другой стороны, не проводит тока, т. е. является диэлектриком.

Далее, предположим, что показанный на чертеже контур представляет собой уложенный в сердечник виток стальной проволоки. Тогда наша схема мало чем будет отличаться от схемы трансформатора, а наш виток — от вторичной обмотки, работающей в условиях короткого замыкания. Единственное различие состоит в том, что вторичная обмотка трансформатора пронизывается не полным магнитным потоком сердечника, а какой-то его частью. Это обстоятельство лишь снизит величину индуктированного в витке напряжения.

При сделанных нами предположениях появление тока в витке, а также его направление не могут вызвать никаких сомнений. Понятным является и допущенное на чертеже кажущееся отступление от правила штопора (стр. 105). Вспомним, что магнитный поток сердечника создан током первичной, а не вторичной обмотки, и что правилом штопора следует пользоваться для определения

направлений магнитного потока и первичного тока. Но мы знаем (стр. 344), что направления токов в первичной и вторичной обмотках противоположны друг другу.

Чтобы перейти от рассмотренной картины к действительной, нам надо лишь представить себе, что проводящей является не часть стального сердечника, не один мысленно выделенный из его объема виток, а весь сердечник. Следовательно, токи будут протекать по всей толще сердечника, охватывая линии магнитного потока. Эти токи называются **вихревыми**. Разумеется, они будут переменными.

Протекание тока по проводнику неизбежно связано с потерями. Вихревые токи будут нагревать сердечник. Это не только означает лишнюю затрату мощности, но и представляет опасность для изоляции обмотки, которая может разрушиться под влиянием высокой температуры. Надо принимать меры к уменьшению величины вихревых токов.

Уменьшение токов достигается **расслоением сердечника**. Сердечник делается не сплошным, а собирается из отдельных изолированных друг от друга стальных листов. Изоляция препятствует токам переходить от листа к листу, и они вынуждены замыкаться вдоль показанных на рис. 11-10 путей. Магнитный поток распределяется поровну между отдельными листами, поэтому индуктированное в каждом листе напряжение будет во столько раз меньше напряжения витка, сколько листов имеет сердечник. Налицо — увеличение сопротивления току, а следовательно, и снижение его величины. Присадка к железу небольших количеств кремния еще больше увеличивает сопротивление.

Вихревые токи не являются единственной причиной нагревания стали и связанных с этим потерь. Если намагнитить сталь, а затем вновь размагнитить ее, то часть энергии окажется потерянной и пойдет на нагревание стали. Чем чаще происходит перемагничивание, т. е. чем больше частота переменного магнитного потока, тем больше величина потерь. Потерям на перемагничивание — их иначе называют **потерями от гистерезиса** — подвержены главным образом железо и его соединения (сталь, чугун и т. п.).

Расходуемая на покрытие этих потерь мощность зависит еще и от величины магнитной индукции, которая существовала в намагниченной стали, и от сорта стали.

Добавление к стали различных примесей снижает величину потерь от гистерезиса.

Потери в трансформаторе проще всего могут быть определены опытным путем. Если разомкнуть вторичную обмотку, а к первичной обмотке приложить нормальное рабочее напряжение трансформатора, то ток во вторичной обмотке будет равен нулю, а в первичной обмотке будет протекать небольшой ток холостого хода (около 5% от тока, соответствующего полной нагрузке трансформатора). Таким образом, потери, вызванные током в первичной обмотке, будут небольшими.

Зато магнитный поток практически будет иметь ту же самую величину, что и при нормальной работе нагруженного трансформатора. Следовательно, потери в стали (т. е. от вихревых токов и гистерезиса) будут теми же, что и в рабочих условиях. Если мы включим в первичную цепь ваттметр, то он покажет величину потерь в стали.

Чтобы определить потери от токов в обмотках, проще всего замкнуть вторичную обмотку накоротко, а к первичной обмотке подвести такое напряжение, чтобы во вторичной обмотке протекал нормальный рабочий ток. Это напряжение (его называют *напряжением короткого замыкания*) составляет 5—10% от нормального.

В этом опыте ток в первичной обмотке будет также равен своему номинальному значению, а магнитный поток будет ничтожно малым, так как подведенное к первичной обмотке напряжение мало. Потерями в стали можно пренебречь, и показание ваттметра, включенного в первичную цепь, можно приравнять потерям в меди обеих обмоток.

Сумма показаний ваттметра в опытах холостого хода и короткого замыкания дает полную величину потерь в трансформаторе.

11-5. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

В некоторых случаях возникает надобность в незначительном изменении заданного напряжения в ту или иную сторону. Эта задача проще всего решается не двухобмоточными трансформаторами, о которых шла речь в предыдущих параграфах, а однообмоточными, или автотрансформаторами.

Если коэффициент трансформации мало отличается от единицы, то невелика будет разница между величиной токов в первичной и во вторичной обмотках. Кроме того, эти

токи имеют различные направления. Что же произойдет, если объединить обе обмотки?

Получится схема, приведенная на рис. 11-11, на которой не показан стальной сердечник трансформатора. Если присоединить источник переменного напряжения к точкам *АО*, то в сердечнике возникнет переменный магнитный поток. В каждом из витков обмотки будет индуктироваться напряжение одной и той же величины. Очевидно, что между вторичными зажимами, т. е. между точками *БО*, возникает напряжение, равное напряжению одного витка, умноженному на число витков, имеющихся между *Б* и *О*.

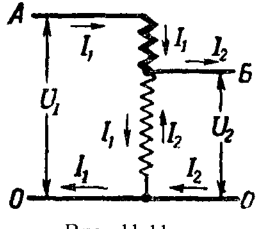


Рис. 11-11.

Если присоединить к вторичным зажимам какую-нибудь нагрузку, то вторичный ток I_2 будет проходить лишь в части обмотки, а именно между *Б* и *О*. Но в этих же витках есть и первичный ток I_1, и оба тока сложатся. По участку *БО* будет протекать разность обоих токов, т. е. очень малая величина. Это позволит выполнить ее из провода малого сечения. Чтобы оценить достигаемую этим экономию меди, надо принять во внимание, что участок *БО* составляет бо́льшую часть всех имеющихся витков. В двухобмоточном трансформаторе этому участку соответствовали бы две обмотки, рассчитанные на полную величину рабочего тока. В автотрансформаторе на полную величину рабочего тока рассчитывается лишь небольшой участок *АБ*.

Сходная картина имела бы место и при питании автотрансформатора со стороны *ОБ*.

11-6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Прямое измерение переменных напряжений и токов при помощи вольтметров и амперметров связано с рядом трудностей. Пусть, например, нам требуется измерить напряжение линии, величина которого составляет около 200 *кв*. Если присоединить вольтметр непосредственно к линии, то понадобилось бы громадное добавочное сопротивление, и конструкция вольтметра получилась бы громоздкой и дорогой.

Кроме того, нечаянное прикосновение к такому вольтметру было бы смертельным для обслуживающего персо-

нала, и читать показания такого вольтметра было бы затруднительно.

Все эти трудности отпадают при включении вольтметра не непосредственно в сеть, а через трансформатор. Для этого применяются трансформаторы напряжения, принцип действия которых тот же, что и у рассмотренных нами силовых трансформаторов. Разница лишь в том, что трансформаторы напряжения рассчитываются на весьма малую мощность.

На рис. 11-12 показана схема включения вольтметра через измерительный трансформатор. Заземление одной из точек цепи вольтметра делает безопасным прикосновение к нему даже при пробое изоляции трансформатора.

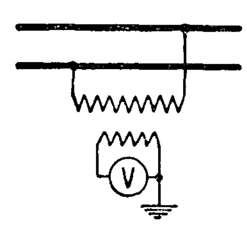


Рис. 11-12.

Очевидно, что трансформатор напряжения является понижающим трансформатором. По нашему стандарту его вторичное напряжение всегда равно 100 *в*. Однако на шкале вольтметра указывается не вторичное, а первичное напряжение. Так, например, если измеряемое напряжение равно 6 600 *в*, то выбирается измерительный трансформатор, у которого коэффициент трансформации равен 66. На шкале вольтметра вместо цифры 50 ставится 50×66=3 300 и т. д. Это позволяет обходиться без дополнительных вычислений.

Сходным образом мы поступаем и в том случае, если надо измерить токи в несколько сот или тысяч ампер. Если пропустить их через обмотку амперметра, то прибор получится непомерно громоздким, а измерение тока — весьма дорогой операцией.

И здесь серьезную услугу может оказать трансформатор. Мы знаем, что, понижая напряжение, трансформатор одновременно увеличивает ток, наоборот, при повышении напряжения трансформатор будет снижать величину тока.

Значит, нам нужен повышающий трансформатор. Его первичной обмоткой будет провод с измеряемым током. Число витков вторичной обмотки зависит от того, во сколько раз мы хотим снизить величину первичного, т. е. измеряемого, тока. Такой трансформатор показан на рис. 11-13.

Обмотка амперметра имеет весьма малое сопротивление, и, следовательно, трансформатор тока работает

в условиях, близких к короткому замыканию. Значение магнитной индукции в стальном сердечнике трансформатора выбирается с учетом размагничивающего действия вторичной обмотки. Если отсоединить амперметр и оставить вторичную обмотку разомкнутой, то магнитный поток в трансформаторе увеличится, намного превзойдя расчетную величину. Сталь трансформатора нагреется, и повышение температуры ее может оказаться опасным. Отсюда следует, что вторичная обмотка трансформатора тока должна быть всегда замкнутой.

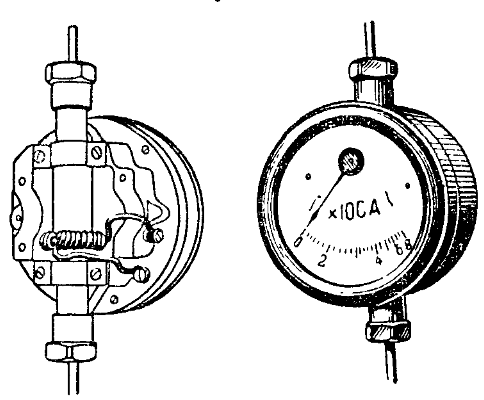


Рис. 11-13. Включение амперметра через трансформатор тока.

Трансформатором тока можно пользоваться и для контрольных измерений тока в тех точках цепи, где не имеется амперметров. Разъемный стальной сердечник, сдвигаемый и раздвигаемый приделанными к нему ручками, охватывает провод, ток которого мы хотим измерить. Изоляторы на ручках предохраняют нас от соприкосновения с токоведущими частями. Такой аппарат (он называется измерительными клещами) удобен тем, что измерение не требует никаких пересоединений, нарушающих работу электрической установки. Внешний вид прибора показан на рис. 11-14.

Наконец, трансформаторы тока применяются при измерении тока (даже небольшой величины) в установках высокого напряжения. Амперметры обычно устанавливаются в помещениях, где находится обслуживающий персонал. Непосредственное измерение (без трансформаторов тока) означало бы опасность прикосновения к ампермет-

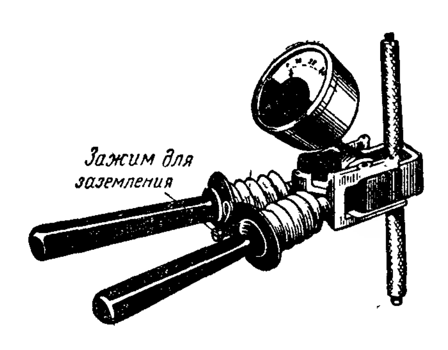


Рис. 11-14. Измерительные клещи. При измерении следует заземлить ручки прибора.

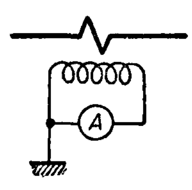


Рис. 11-15. Заземление амперметра, включенного во вторичную обмотку трансформатора тока.

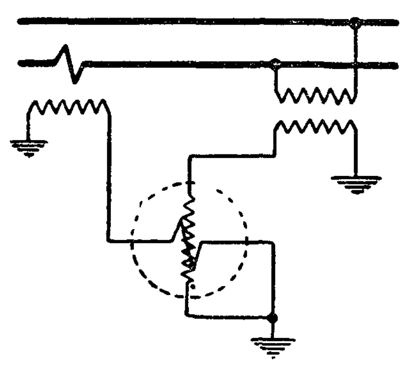


Рис. 11-16. Включение ваттметра через трансформаторы тока и напряжения

ру, т. е. к находящемуся под высоким напряжением проводу.

Мы избегнем непосредственной опасности, если обеспечим надежную изоляцию между рабочим проводом (т. е. первичной обмоткой) и вторичной обмоткой трансформатора тока. Остается косвенная опасность— после пробоя изоляции. Ее мы устраним заземлением одного из концов вторичной обмотки. Схематически это показано на рис. 11-15.

Число витков во вторичной обмотке трансформатора тока берется с таким расчетом, чтобы рабочий ток в ней равнялся 5 *а*.

Для включения ваттметров приходится пользоваться одновременно трансформаторами напряжения и тока. Соответственная схема показана на рис. 11-16.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

12-1. ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Простейший генератор переменного тока мы уже рассматривали в гл. 6 (рис. 6-1 и 6-5).

Для получения переменного тока нам нужно было,

чтобы виток был сцеплен с переменным магнитным потоком. Для этого мы вращали виток в постоянном магнитном поле.

Если виток оставить неподвижным, а вращать постоянный магнит, результат будет таким же. На рис. 10-1 был показан такой генератор. Обычно так и устраивают в генераторах переменного тока. При этом обмотка переменного тока, содержащая большое число витков, укреплена неподвижно и может быть более надежно изолирована. Это особенно важно для машин, рассчитанных на высокое напряжение.

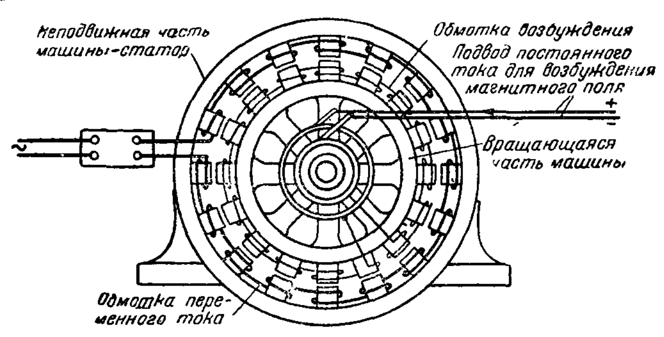


Рис. 12-1. Многополюсный генератор переменного тока.

Чтобы получить достаточно большой магнитный поток (не увеличивая чрезмерно размера машины), витки располагают на неподвижном, собранном из тонких листов стальном сердечнике (статор), через который магнитный поток может легко проходить.

Воздушный зазор между вращающимся электромагнитом (ротор) и статором делают очень малым.

Одному полному обороту ротора соответствует один период переменного тока. Для того чтобы получать переменный ток, имеющий 50 *гц*, надо вращать ротор со скоростью 50 *об/сек*. В минуту (60 *сек*) такой ротор будет делать 3 000 *об*. С такой скоростью и вращается большинство турбогенераторов, т. е. генераторов переменного тока, приводимых во вращение паровыми турбинами.

С меньшей скоростью должны вращаться многополюсные генераторы переменного тока. Такой генератор показан на рис. 12-1.

На рис. 12-2 и 12-3 показана в большем масштабе часть того же генератора.

Из этих рисунков видно, что при вращении ротора изменяется магнитный поток, проходящий через обмотку статора, и, значит, в ней должна наводиться э. д. с.

Сравните между собой рис. 12-2 и 12-3, на них магнитный поток проходит через обмотки статора в прямо противоположных направлениях.

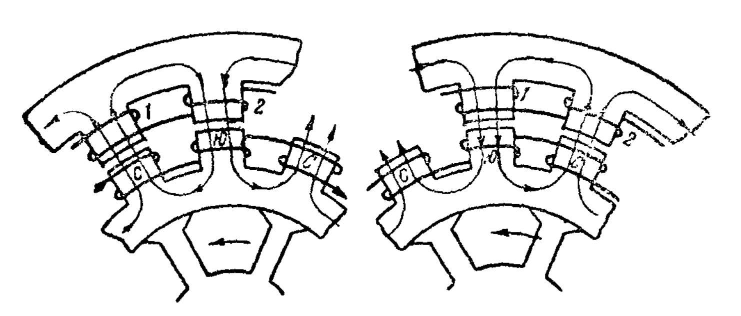


Рис. 12-2. В этом положении ротора против витков *1* расположен северный магнитный полюс, а против витков *2* — южный.

Рис. 12-3. Здесь в отличие от рис. 12-2 против витков *1* расположен южный полюс, а против витков *2* — севериый.

Если ротор будет вращаться дальше и повернется еще на столько же, мы придем к положению, которое совершенно подобно с указанным на рис. 12-2: против витков *1* вновь будет северный магнитный полюс, а против витков *2* — южный.

Такое перемещение, после которого мы как бы вернулись к исходному положению, соответствует целому периоду. Значит, теперь период соответствует повороту на $^1/_8$ часть окружности (так как мы имеем восемь пар полюсов). Для получения 50 периодов в секунду наш генератор должен делать:

$$50\frac{1}{8}60 = 375\ \text{об/мин}.$$

Генератор с p пар полюсов должен делать:

$$\frac{f\cdot 60}{p}\ \text{об/мин};$$

здесь f — частота получаемого переменного тока.

12-2. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотренные выше машины переменного тока могут работать и в качестве двигателей.

Пусть, например, ротор расположен относительно статора так, как это показано на рис. 12-4, и пусть переменный ток, текущий по обмотке статора, в этот момент течет в направлении, показанном на рис. 12-4. Этот ток теперь будет намагничивать сталь статора, создавая на нем чередующиеся северные и южные полюсы (через северные полюсы магнитный поток выходит, через южные входит).

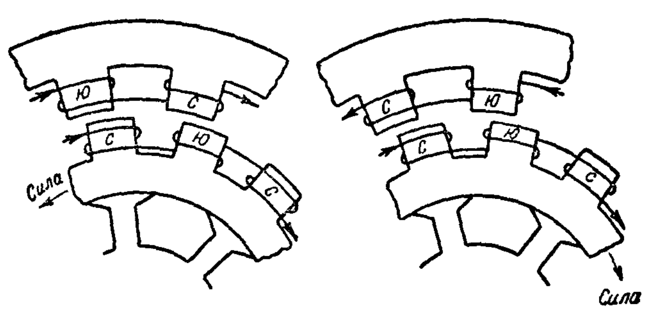


Рис. 12-4. Разноименные полюсы притягиваются, ротор стремится повернуться налево.

Рис. 12-5. Ротор стремится повернуться направо.

Мы знаем, что разноименные полюсы притягиваются, а одноименные отталкиваются, поэтому, взглянув на рис. 12-4, можно убедиться в том, что магнитные силы будут стремиться повернуть ротор против часовой стрелки.

Но через половину периода ток в статоре уже будет иметь противоположное направление. Если ротор остался на прежнем месте (как это показано на рис. 12-5), то теперь силы взаимодействия между полюсами будут стремиться повернуть ротор в обратную сторону, т. е. по часовой стрелке. Поэтому, если ротор был неподвижен при включении переменного тока в обмотку статора, он и не сдвинется с места; на ротор будут действовать быстро чередующиеся силы противоположных направлений. Совсем иное дело будет, если ротор предварительно раскрутить и вращать с такой скоростью, что за время полупериода он переместится из положения, указанного на рис. 12-4, в положение рис. 12-6.

В самом деле, теперь полюсы ротора повернулись так, что при новом направлении тока в обмотках статора взаимодействие магнитных полюсов статора и ротора стремится вращать ротор все в том же направлении.

Теперь уже не нужно прибегать к посторонней силе для кручения ротора, он будет продолжать вращаться с той же скоростью благодаря взаимодействию токов (их магнитного поля).

Эта скорость вращения, в точности соответствующая скорости изменения магнитного поля статора, называется *синхронной скоростью*.

С другой скоростью при 50-периодном токе ротор вращаться не может, поэтому такие машины называют *синхронными*. В самом деле если бы ротор вращался со скоростью, отличной от синхронной, то очень скоро изменения положения полюсов ротора и изменения полюсов статора перестали бы соответствовать одно другому; они как бы перестанут попадать в такт. При этом, как говорят, вращение ротора выпадает из синхронизма.

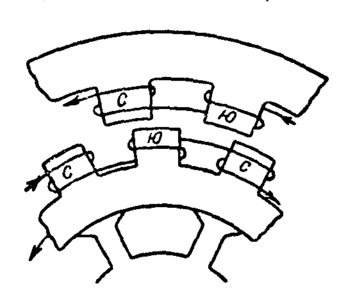


Рис. 12-6. Ротор стремится повернуться налево.

Чем больше пар полюсов имеет синхронная машина, тем медленнее она будет вращаться.

На практике синхронные машины строят как с одной парой полюсов (быстроходные генераторы, приводимые во вращение паровыми турбинами), так и с десятками пар полюсов (например, тихоходные генераторы, приводимые во вращение водяными турбинами).

Из рассмотренного примера ясно, почему ротор должен быть раскручен к моменту присоединения переменного тока, но важно обратить внимание еще на следующее: переменный ток, протекающий через обмотку статора должен быть таким, чтобы его взаимодействие с магнитным полем постоянного тока создавало вращающую силу требуемого направления. Если бы положению ротора, изображенному на рис. 12-6, соответствовал переменный ток противоположного направления, то машина не пошла бы. Вместо того чтобы поддерживать вращение, электромагнитное взаимодействие ему препятствовало бы.

Поэтому для присоединения синхронной машины к сети

необходимо не только дать машине нормальную скорость вращения, но и убедиться в том, что ход изменения напряжений на машине и в сети одинаков.

12-3. ТРЕХФАЗНЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотренные сейчас машины являлись однофазными машинами переменного тока. На практике значительно большее распространение получили трехфазные машины, изобретенные нашим соотечественником М. О. Доливо-Добровольским.

Чтобы понять, как они устроены, нужно еще раз вспомнить, что трехфазная цепь переменного тока представляет собой как бы простую комбинацию трех однофазных цепей, в которых токи (или напряжения) изменяются по тому же периодическому закону с одной и той же частотой, но с определенным сдвигом по фазе. Ток во второй фазе отстает на $^1/_3$ периода от тока в первой фазе, а ток в третьей фазе отстает на $^1/_3$ периода от тока во второй фазе.

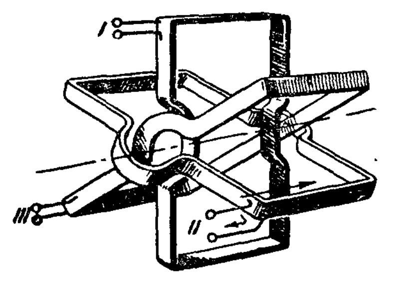


Рис. 12-7. Расположение обмоток в статоре трехфазной синхронной машины.

Возьмем три катушки и закрепим их неподвижно, расположив их так, как показано на рис. 12-7, т. е. так, чтобы между соседними катушками был угол в 120°. Внесем теперь внутрь этих катушек еще одну подвижную катушку, выполненную в виде рамки. Ток к этой рамке подводится через кольца. На рис. 12-7 рамка не показана для того, чтобы не затемнять рисунка. Расположение подвижной рамки показано на рис. 12-8, на котором для большей отчетливости первая и третья катушки показаны неполностью. В действительных машинах неподвижные катушки располагаются на внутренней поверхности стального статора, а подвижная рамка — на стальном цилиндре (роторе), вдвинутом внутрь статора. Ротор может свободно вращаться внутри статора. Подобное расположение обмоток показано на рис. 12-9.

Около всех соответственных сторон обмотки на рис. 12-8 и 12-9 поставлены одни и те же буквы. Соедине-

ние между концами обмоток, заложенных **в железе**, на рис. 12-9 не показано.

Посмотрим теперь, какие силы будут возникать в результате электромагнитного взаимодействия между подвижной рамкой и тремя неподвижными катушками, если эти три катушки питать трехфазным током, а подвижную катушку питать током постоянным.

Для того чтобы проследить за тем, как будет изменяться ток во всех трех катушках, нужно иметь график изменений токов первой, второй и третьей фаз. Такой график

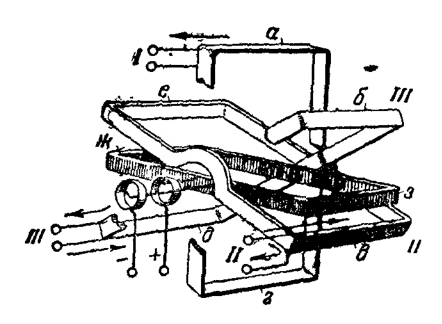


Рис. 12-8. Расположение обмоток в статоре и роторе трехфазной синхронной машины.

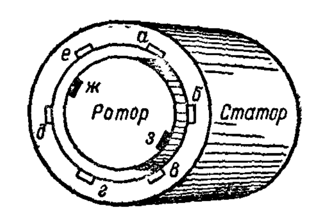


Рис. 12-9. Схематическое изображение расположения обмоток на стали статора и ротора в синхронной машине.

представлен на рис. 12-10. Начнем с того момента времени, когда ток первой фазы достиг наибольшей величины, допустим 100 *а*. В этот момент токи второй и третьей фаз отрицательны и равны каждый 50 *а*. Через промежуток времени в $^1/_{600}$ долю секунды ток во второй фазе стал равен нулю, а в первой фазе ток должен уменьшиться приблизительно до 87 *а*. Ток в третьей фазе будет такой же величины, т. е. 87 *а*, но он будет иметь противоположное направление.

Когда пройдет $^1/_{200}$ доля секунды, считая от начального момента, ток в первой фазе спадет до нуля, ток во второй фазе будет уже положительным, ток в третьей фазе остается отрицательным. По величине оба эти тока равны тем же 87 *а*.

Наконец, через $^1/_{100}$ долю секунды, считая от начального момента, ток в первой фазе будет опять равен 100 *а*, но только он будет отрицательным, а токи в фазах второй и третьей будут равны каждый 50 *а* (оба положительны).

Таким же точно способом можно найти значение токов и для любого иного момента времени.

Как же будет взаимодействовать постоянный ток, протекающий во внутренней рамке, с трехфазным током, протекающим в трех неподвижно закрепленных обмотках? Будут ли в состоянии силы механического взаимодействия

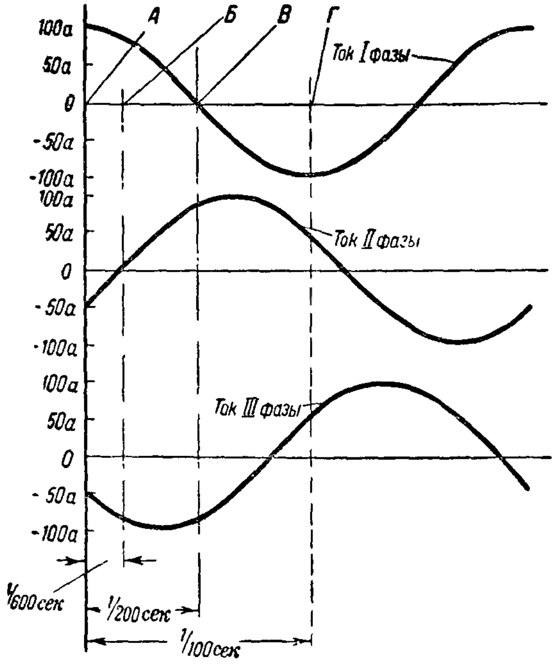


Рис. 12-10. Токи в обмотках трехфазной синхронной машины.

привести во вращение нашу рамку? — Да, если только рамка предварительно была раскручена.

Параллельные провода с токами, направленными одинаково, взаимно притягиваются, но если направление одного из токов изменится на противоположное, эти провода будут не притягиваться, а отталкиваться. Параллельные провода с токами, направленными в противоположные стороны, взаимно отталкиваются (стр. 113).

Раскрутим нашу рамку так, чтобы получить 3 000 *об/мин* (мы сейчас увидим, что это как раз нужная скорость) и чтобы в тот момент, когда ток в первой ка-

тушке достигает наибольшей величины, рамка находилась как раз посредине между второй и третьей катушками.

Такое положение рамки показано на рис. 12-11,*А*. На этом рисунке обозначены против каждой из шести сторон обмоток величины токов, притекающих к обмоткам. Там, где ток положителен (например, +50 *а*), это значит, что ток течет за плоскость рисунка там, где ток отрицателен (например —50 *а*), это значит, что ток течет из-за плоскости рисунка. Провода с отрицательным током показаны на фигуре черными, провода с положительным током заштрихованы.

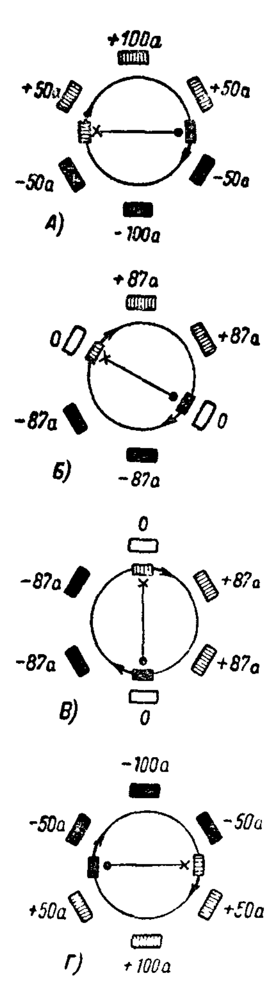


Рис. 12-11. Взаимное расположение токов в статорной и роторной обмотках синхронной машины в разные моменты времени.

Кроме того, направление постоянного тока во вращающейся рамке указано согласно принятому условному обозначению: крестик — ток течет за плоскость рисунка (от нас), точка — ток течет из-за плоскости фигуры (к нам).

Одинаково направленные токи притягиваются, противоположно направленные — отталкиваются.

На основании этого легко заключить, что взаимодействие трехфазного и постоянного токов в момент времени, для которого сделан рис. 12-11,*А*, таково, что рамка будет стремиться повернуться по часовой стрелке. Направление действующих на рамку сил показано на рисунке стрелками.

Посмотрим, что будет происходить при дальнейшем вращении рамки.

Когда пройдет $^1/_{600}$ *сек*, рамка повернется на $^1/_{12}$ часть окружности. Но этому новому положению рамки соответствуют и новые зна-

чения токов. Во второй фазе ток теперь равен нулю, значения токов двух других фаз указаны на рис. 12-11,*Б*, соответствующем этому моменту времени.

Когда пройдет $^1/_{200}$ *сек* (считая с момента, соответствующего начальному положению рамки), рамка повернется на $^1/_4$ окружности. Это новое положение рамки и соответствующие этому моменту токи показаны на рис. 12-11,*В*.

Наконец, на рис. 12-11,*Г* показаны токи и положение рамки, которые имеют место через $^1/_{100}$ *сек*.

Помня, что одинаково направленные токи притягиваются (а противоположно направленные отталкиваются), легко увидеть, что во всех рассмотренных положениях на рамку будут действовать силы, стремящиеся поворачивать ее в одну и ту же сторону. Вращение рамки будет поддерживаться взаимодействием трехфазного и постоянного тока.

Так работают трехфазные синхронные двигатели. Вращая ротор такой трехфазной машины каким-либо посторонним двигателем (турбиной, дизелем), можно заставить его работать как генератор трехфазного тока.

12-4. РАБОТА СИНХРОННЫХ МАШИН

Синхронные машины должны вращаться со строго определенной скоростью. Уменьшение скорости вращения хотя бы на 1% приводит к тому, что изменения тока в обмотке переменного тока перестают соответствовать изменениям в положении обмотки постоянного тока, они как бы выпадают из такта, машина выпадает из синхронизма: обмотка постоянного тока подвергается усилиям, направленным то в одну, то в другую сторону, и машина останавливается.

Для того чтобы понять, что происходит в синхронных машинах, прежде всего нужно обратить внимание на то, что синхронные двигатели и синхронные генераторы устроены совершенно одинаково. Во всяком синхронном двигателе, приведенном во вращение, начинает наводиться э. д. с., если только в его обмотке возбуждения протекает ток. Как происходит наведение переменного напряжения (явление электромагнитной индукции) в однофазном генераторе, мы уже рассматривали достаточно подробно. Но точно так же наводится напряжение и в обмотках трехфазных машин. Только напряжения во всех трех обмотках будут сдвинуты друг относительно друга по фазе. Дей-

ствительно, мы знаем, что наведенное напряжение равно нулю, когда ось катушки переменного тока совпадает с осью обмотки постоянного тока; в этот момент почти весь магнитный поток, создаваемый обмоткой постоянного тока, проходит через рассматриваемую катушку (рис. 6-2).

Магнитный поток уже перестал увеличиваться и еще не начал уменьшаться: скорость его изменения равна нулю. Значит, именно в этот момент напряжение также имеет нулевое значение.

Если мы имеем три катушки, сдвинутые в пространстве одна относительно другой на $1/3$ окружности, то промежуток времени, отделяющий прохождение через нуль напряжения в двух смежных катушках, будет равен $1/3$ периода, т. е. тому времени, которое требуется для того, чтобы обмотка постоянного тока повернулась на $1/3$ *об*, так как одному периоду соответствует один полный оборот.

Таким образом, индуктируется трехфазное напряжение.

Возьмем теперь две совершенно одинаковые синхронные машины, пропустим через их роторные обмотки одинаковый постоянный ток и приведем их во вращение с совершенно одинаковой скоростью. Естественно, что при этом э. д. с., наводимые в двух наших генераторах, будут одинаковыми по величине: машины одинаковые, постоянный ток, создающий магнитное поле, также одинаков, скорость вращения тоже одна и та же.

Частота получаемого переменного напряжения также должна быть одинаковой — ведь машины вращаются с одинаковой скоростью.

Но напряжения наших двух машин могут не совпадать по фазе. Действительно, пусть, например, в какой-то момент времени в первой машине ось обмотки возбуждения совпала с осью катушки первой фазы, а во второй машине в тот же самый момент ось обмотки возбуждения еще не дошла, скажем, на $1/6$ долю окружности до совпадения с осью своей катушки первой фазы.

Ясно, что в этом случае будет существовать сдвиг по фазе между напряжениями первых катушек первой и второй машин.

Такой же сдвиг по фазе будет существовать и между напряжениями вторых и третьих катушек первой и второй машин.

В данном случае этот сдвиг между всеми фазовыми напряжениями будет равен $1/6$ периода, на эту величину будут отставать напряжения второго генератора.

Этот сдвиг по фазе, очевидно, определяется относительным положением роторов первой и второй машин переменного тока: если оба ротора все время одинаково расположены относительно обмоток переменного тока своих машин, то не будет никакого сдвига фаз; если ротор второй машины опережает ротор первой машины, то соответственно и напряжения, наводимые во второй машине, будут опережать напряжения первой машины.

Пусть обе машины отрегулированы так, что между их напряжениями нет сдвига (кроме того, по-прежнему предполагаем, что напряжения одинаковы по величине и имеют одинаковую частоту). Это значит, что в каждый момент напряжение первой машины равно напряжению второй машины. Если теперь взять и соединить соответственные концы обмоток наших машин, то в получившейся замкнутой цепи ток протекать не будет.

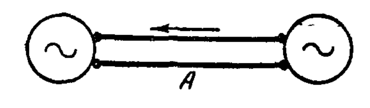
Но попробуем теперь немного сместить относительное положение ротора второй машины. Скажем, заставим его немного отставать (обратите внимание, что для этого нужно не только перестать прилагать силу для ее вращения, но и приложить усилие против направления вращения машины). Теперь в цепи потечет ток. Действительно, теперь напряжения двух машин сдвинутся по фазе и разность этих двух напряжений уже не будет равна нулю, а будет вызывать протекание тока в цепи. Этот ток сдвинут по фазе относительно напряжений как первой, так и второй машины. При этом сдвиг по фазе между током и напряжениями первой и второй машин будет различным. Действительно, в тот момент, когда для первой машины ток по одному из проводов течет от машины в сеть, для другой машины этот же ток (по тому же проводу) течет из сети в машину (рис. 12-12).

Одна машина при этом будет работать генератором, другая двигателем. Очевидно, что двигателем будет работать та машина, у которой ротор относительно отстает, а генератором будет работать та машина, у которой ротор относительно опережает.

Это понятно из чисто механических соображений: та машина, которая вращается, преодолевая тормозящее усилие, поддерживающее относительное отставание ротора, работает двигателем; та машина, к которой нужно прилагать усилие, направленное в сторону ее вращения, чтобы поддерживать относительное опережение ротора, работает

генератором, так как к ней будет подводиться механическая энергия.

Чем больше угол сдвига между роторами обеих машин, тем больше будет разность их электродвижущих сил, тем больший ток будет протекать в обмотках переменного тока, тем больше будет и сила взаимодействия между переменным и постоянным токами, протекающими в машинах.



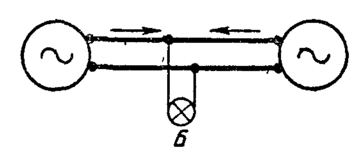


Рис. 12-12. На чертеже *А* схематически показаны два генератора переменного тока. Ток, протекающий в верхнем проводе цепи, для одного из генераторов течет от генератора в сеть, а для другого — из сети в генератор. На чертеже *Б* эти же генераторы питают потребителя, изображенного в виде лампы накаливания. В этом случае ток, протекающий в верхнем проводе, может для обоих генераторов одновремению иметь направление от генератора в сеть.

Больший сдвиг ротора соответствует большей механической нагрузке. Сам ротор, после того как он немного сдвинулся назад, продолжает вращаться с прежней скоростью.

Мы предположили, что в наших двух синхронных машинах наводится напряжение, одинаковое по величине. Но как регулировать напряжение? Иначе говоря, как уменьшить или увеличить напряжение синхронного генератора? Очень просто, нужно только изменить величину постоянного тока. Действительно, изменяя величину постоянного тока, тем самым мы будем изменять величину магнитного потока, и чем больше будет изменяющийся магнитный поток, тем больше будет и напряжение, наводимое в машине (разумеется, при постоянстве других условий, т. е. если речь идет о той же самой машине, если ротор вращается с прежней скоростью).

Постоянный ток, создающий магнитное поле в синхронной машине, называют током возбуждения. Чем больше ток возбуждения, тем больше напряжение, наводимое в машине.

12-5. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Крупные электрические сети питаются не одним, а несколькими генераторами. Когда мощность, забираемая потребителями, уменьшается (например, в ночное время),

часть генераторов отключается от сети. В часы максимума нагрузки эти генераторы снова присоединяются.

Для того чтобы два генератора могли работать на одну и ту же сеть, т. е. параллельно, необходимо соблюдение ряда условий. Во-первых, в их обмотках должна индуктироваться одинаковая по величине э. д. с. Если это условие не выполнено, то по обмоткам обеих машин будет протекать уравнительный ток. Электродвижущая сила машины отличается от напряжения на зажимах на величину падения напряжения в обмотке. При параллельной работе напряжения машин одинаковы. Если, например, присоединить к сети невозбужденную машину, то в ее статорной обмотке появится ток короткого замыкания, равный по величине напряжению сети, деленному на сопротивление обмотки, которое обычно невелико. Очевидно, что такой же ток будет протекать и по обмотке работающей машины.

Во-вторых, э. д. с. обмотки машины, присоединяемой к сети, должна совпадать по фазе с напряжением сети. Чтобы оценить важность этого требования, предположим, что к сети присоединяется машина, э. д. с. которой сдвинута относительно сетевого напряжения на полпериода. Это еще хуже, чем присоединение невозбужденной машины: там падение напряжения в обмотке равнялось напряжению сети, здесь оно будет вдвое больше, так как знак э. д. с. противоположен знаку напряжения сети.

В-третьих, э. д. с. присоединяемой машины должна иметь ту же самую частоту, что и сеть. Предположим, что это условие не выполнено и что частота сети равна 50 *гц*, а э. д. с. присоединяемой машины имеет частоту 46 *гц*. Пусть включение на параллельную работу произошло в момент, когда и напряжение сети и э. д. с. машины имели нулевое значение, и найдем их значения через $^1/_8$ *сек*. Это время соответствует $^1/_8 : {}^1/_{50} = 6^1/_4$ периодов сети, и, следовательно, напряжение сети будет равно максимуму. Это же время соответствует $^1/_8 : {}^1/_{46} = 5^3/_4$ периодам присоединенной машины, и, следовательно, ее э. д. с. будет направлена навстречу напряжению сети. Получается картина, совпадающая с только что рассмотренной.

Для того чтобы убедиться в выполнении перечисленных условий, пользуются схемой, показанной на рис. 12-13. Прежде чем замкнуть рубильник, его ножи соединяются с зажимами через лампы. При наличии уравнительного тока лампы будут гореть, и машину включать нельзя. Надо

добиться такого положения вещей, чтобы лампы не горели. Но отсутствие накала в лампах еще не доказывает отсутствия в них тока, и поэтому к ним добавляется еще вольтметр, учитывающий наличие даже небольшой разницы в напряжениях между сетью и приключаемой машиной.

Рассмотрим, как сложатся условия после того, как машина приключена к сети. Так как ее э. д. с. была в точности равна напряжению сети, то ток в якорной обмотке равен нулю, и, следовательно, машина никакой нагрузки не несет. Чтобы нагрузить ее, необходимо, чтобы по обмотке протекал ток. Спрашивается, как это сделать.

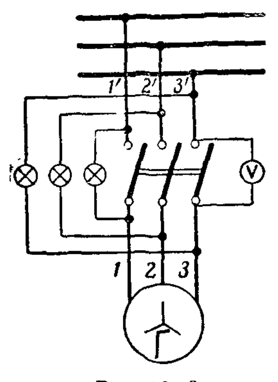


Рис. 12-13.

На первый взгляд кажется, что задача может быть решена изменением возбуждения машины, т. е. изменением ее э. д. с. Действительно, если мы, например, уменьшим ток возбуждения, то уменьшится и величина (но не фаза) индуктированной э. д. с. Якорная обмотка представляет собой почти чистое индуктивное сопротивление, и, следовательно, между током и напряжением будет существовать сдвиг по фазе $^1/_4$ периода (стр. 254). Средняя мощность за полпериода будет равна нулю, и такая машина будет вести себя, как индуктивный потребитель.

Если увеличить ток возбуждения настолько, что наведенная в машине э. д. с. станет больше напряжения сети (в этом случае машину называют перевозбужденной), то сдвиг между напряжением и током также будет равен $^1/_4$ периода, но ток будет опережать напряжение. Машина будет вести себя, как емкостный потребитель, и этим ее свойством часто пользуются для компенсации сдвига фаз, для улучшения коэффициента мощности.

Итак, изменением возбуждения не удается нагрузить машину. Остается изменить фазу э. д. с. машины по отношению к напряжению сети. И в этом случае в обмотке должен появиться ток, и если этот ток будет в фазе с напряжением (или даже отличаться от него, но на величину, меньшую, чем $^1/_4$ периода), то мы заставим вновь включенную машину взять на себя часть мощности, посылае-

мой в сеть. Возникает вопрос, следует ли добиваться того, чтобы э. д. с. опережала напряжение сети или же, наоборот, отставала от него.

Вспомним, что машина приводится во вращение механическим двигателем — паровой или гидравлической турбиной. Нагрузить машину — это значит нагрузить механический двигатель, заставить его работать с большей нагрузкой. Поэтому естественно увеличить скорость вращения двигателя. Может показаться, что тем самым мы выведем машину из синхронизма. Да, но на очень короткий срок.

Как только ротор увеличит свою скорость, в статорной обмотке появится ток, и возникнут механические силы взаимодействия между токами статора и ротора. Эти силы будут тормозящими, и величина тормозящего усилия будет тем больше, чем больше величина протекающих по обмотке токов. Ротор начнет вращаться с синхронной скоростью, но его положение относительно магнитного поля машины изменится на некоторый угол, величина которого определяет развиваемую им мощность.

Если бы мы начали каким-нибудь образом тормозить ротор, например путем уменьшения скорости вращения механического двигателя, то и в этом случае в обмотке машины появился бы ток. Но силы взаимодействия между токами теперь стремились бы ускорить вращение ротора, и машина работала бы двигателем, забирая мощность из сети.

12-6. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Токи, протекающие по обмоткам трехфазного генератора, создают вокруг себя магнитное поле. Направление этого магнитного поля может быть определено по правилу штопора: глядя на направление тока, мы будем видеть положительное направление магнитного поля совпадающим с направлением хода часовой стрелки.

Пользуясь этим правилом, определим, как будет направлено трехфазное магнитное поле в различные моменты времени. При этом нас интересует направление тех линий поля, которые проходят по телу ротора машины.

Из рис. 12-14,*А* видно, что обе группы токов — и положительные и отрицательные — дают магнитное поле, направленное справа налево. В следующий момент времени (рис. 12-14,*Б*) в связи с изменением токов в обмотках магнитное поле несколько повернется в направлении хода

часовой стрелки. За время, соответствующее одному периоду переменного тока, магнитное поле сделает один полный оборот.

Такое вращающееся магнитное поле от трехфазного тока используется еще в одном типе машин переменного тока, конструкция которых очень проста. Это так называемые *асинхронные двигатели*. Простота обращения с ними, так же как простота их конструкции, легко объясняет, почему трехфазные асинхронные двигатели получили исключительно широкое распространение.

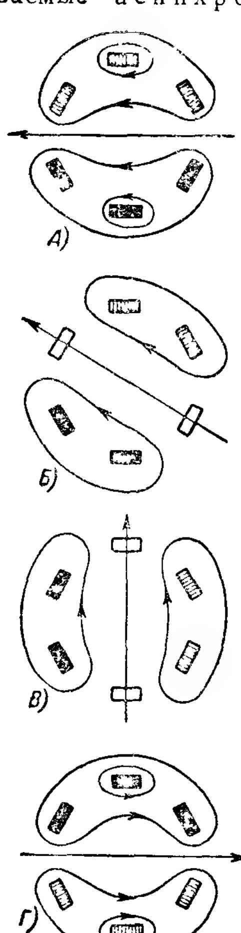


Рис. 12-14. Обмотка статора создает вращающееся магнитное поле.

12-7. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Расположим на статоре три обмотки, оси которых сдвинуты на угол в 120° одна относительно другой, и приключим их к источнику трехфазного тока. Эти обмотки создадут *вращающееся магнитное поле*. Но вместо того чтобы обмотку ротора питать постоянным током (как это делается в синхронных машинах), замкнем ее накоротко или через какое-нибудь небольшое сопротивление, подключаемое к щеткам, скользящим по кольцам.

В такой замкнутой обмотке ток будет возникать, как во вторичной обмотке трансформатора. Действительно, если обмотка ротора неподвижна или *вращается со скоростью меньшей скорости вращения магнитного поля*, то магнитный поток, пронизывающий эту обмотку, будет все время меняться. Благодаря изменению магнитного потока в ней будет наводиться напряжение, и, если только цепь замкнута, в этой обмотке будет протекать ток. Взаимодействие токов неподвижной трехфазной обмотки и обмотки ротора и создает силы, приводящие ротор асинхронного двигателя во вращение.

Таким образом, выходит, что ротор двигателей такого типа должен вращаться медленнее вращения поля, несинхронно с ним. Отсюда и название двигателей — асинхронные (т. е. несинхронные).

Действительно, если бы ротор вращался с такой же скоростью как и магнитное поле, не было бы никакого изменения магнитного потока, сцепленного с его обмоткой.

Напротив, чем медленнее вращается ротор, тем больше он отстает от вращающегося магнитного поля, тем больше будет скорость изменения магнитного потока, сцепленного с его обмоткой, а значит, тем больше будет и наводимое в роторной обмотке напряжение. С увеличением напряжения в свою очередь увеличивается ток в обмотке ротора.

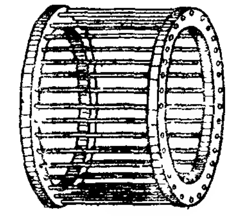


Рис. 12-15. Беличье колесо.

Но мы уже видели, когда рассматривали устройство трансформаторов, что чем больший ток течет во вторичной обмотке, тем больший ток протекает и в первичной. Это остается справедливым и для асинхронных двигателей.

Скорость вращения асинхронных двигателей зависит от механической нагрузки двигателя: чем больше он нагружен, тем больше вращение его ротора будет отставать от вращения магнитного поля.

Это понятно: ведь большая нагрузка (начинающая сильнее препятствовать вращению ротора) требует большего вращающего усилия, это большее вращающее усилие может быть получено за счет увеличения взаимодействующих токов. Но большему отставанию ротора как раз и соответствуют большие токи.

Однако более подробное исследование работы асинхронных двигателей показывает, что при чрезмерном уменьшении скорости вращения ротора начинает уменьшаться и вращающее усилие. Как правило, асинхронные двигатели работают с очень незначительным изменением скорости их вращения.

Обмотка ротора в асинхронном двигателе может выполняться по-разному. Широкое распространение получила обмотка, состоящая, как и обмотка статора, из трех обмоток, концы которых выведены к трем (а не к двум) контактным кольцам. Наибольшее распространение получи-

ла также обмотка, выполненная в форме беличьего колеса. Эта обмотка представляет собой ряд стержней, уложенных в пазах по поверхности железного ротора. С каждой стороны концы этих стержней непосредственно соединены между собой кольцом. Такая обмотка (беличье колесо) показана на рис. 12-15.

12-8. ПУСК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При неподвижном роторе ток в асинхронном двигателе может достигать слишком больших значений.

Поэтому для ограничения пускового тока асинхронных двигателей в цепь ротора при пуске иногда вводят дополнительное сопротивление. Ясно, что если обмотка ротора выполнена в форме беличьего колеса, ни о каком введении дополнительного сопротивления не может быть и речи.

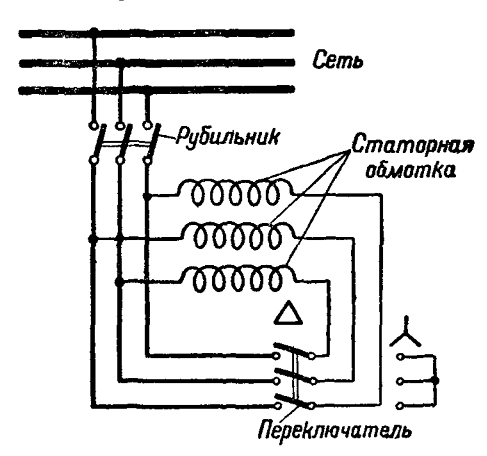


Рис. 12-16.

В этом случае также иногда приходится ограничивать величину тока в статорной обмотке. Пусть обмотки статора соединены между собой треугольником. Если те же самые обмотки соединить звездой, то сопротивление цепи увеличится, и ток в обмотке уменьшится.

В самом деле, если обмотки соединены треугольником, то каждая из них находится под линейным напряжением, а при соединении звездой — под фазовым, т. е. в $\sqrt{3}$ раз меньшим. Ток в статорной обмотке уменьшается также в $\sqrt{3}$ раз, а ток в сети в 3 раза.

Схема такого переключателя показана на рис. 12-16. Двигатель присоединяется к сети при разомкнутом переключателе. После этого переключатель переводится в правое положение, чем достигается соединение обмоток в звезду. После того как двигатель раскрутится, переключатель переводится в левое положение, и в этом положении он остается в течение всей работы.

12-9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЧЕТЧИКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Своеобразным типом асинхронного двигателя является индукционный счетчик переменного тока. Так как счетчик должен учитывать энергию, забираемую потребителем из сети, то число оборотов счетчика за какой-нибудь промежуток времени должно быть пропорциональным этой энергии, т. е. показания, которые мы читаем на счетчике, являются

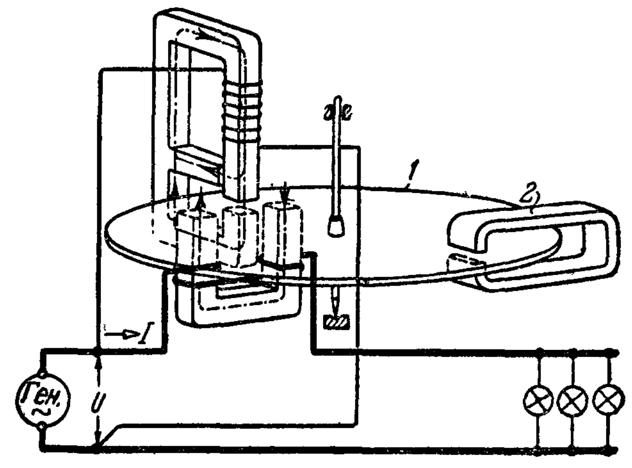


Рис. 12-17. Счетчик переменного тока.
1 — алюминиевый диск; *2* — постоянный магнит.

по существу числом сделанных счетчиком оборотов или величиной, пропорциональной этому числу.

Итак, вращающий момент двигателя должен быть пропорционален мощности потребителя. Поэтому вращающееся поле счетчика создается двумя магнитными потоками, из которых один пропорционален напряжению потребителя, а другой — его току (рис. 12-17). Для этого одна из обмоток присоединяется непосредственно к сети, а по другой пропускается ток потребителя.

Роль ротора выполняет алюминиевый диск *1*. Переменный магнитный поток индуктирует в нем вихревые токи. Эти токи, взаимодействуя с магнитным полем, заставляют диск вращаться.

Существенной деталью счетчика является постоянный магнит *2*, в поле которого вращается диск. Так как диск вращается относительно поля постоянного магнита, то в нем будет индуктироваться ток, величина которого будет тем больше, чем больше скорость вращения диска. Этот ток всегда направлен таким образом, что стремится затормозить диск, и он может быть уподоблен механической нагрузке асинхронного двигателя.

Но эта «нагрузка» не может остановить диска, так как при уменьшении скорости вращения будет уменьшаться тормозящее усилие. В итоге устанавливается равновесие между вращающим моментом (он пропорционален мощности потребителя) и тормозящим моментом (он пропорционален скорости вращения диска). Следовательно, получается прямая пропорциональность между мощностью, забираемой потребителем, и скоростью вращения диска.

Энергия равна произведению мощности на время, точно так же число оборотов, сделанное диском, равно произведению скорости вращения на время. Значит, число оборотов, сделанное счетчиком, прямо пропорционально энергии, полученной потребителем.

Поэтому в счетчиках энергии вращающийся диск связан со счетным механизмом, вроде тех, которые ставятся на велосипедах для учета пройденного пути.

12-10. ПОТЕРИ В СТАЛИ, МЕДИ И К. П. Д. ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Мощность, получаемая электрическими машинами, всегда меньше мощности, отдаваемой ими: часть мощности непроизводительно теряется в самих машинах. Это справедливо для любых процессов: происходит ли превращение электрической мощности в электрическую, как в трансформаторах, происходит ли преобразование механической мощности в электрическую, как в генераторах, или электрической в механическую, как в двигателях.

Потеря мощности в электрических машинах обычно бывает очень невелика, она составляет 5—15% от преобразуемой мощности.

Потери в электрических машинах могут быть разделены на три части: потери мощности на механическое трение (во вращающихся машинах), потери мощности на нагрев проводов, по которым протекает ток (потери в меди) определяемые по закону Ленца—Джоуля, и потери мощности, связанные с перемагничиванием стали (потери от вихревых токов и потери от гистерезиса).

Все эти три вида теряемой мощности в результате идут на нагрев машины.

В тех частях машины, где имеется переменное магнитное поле, железо расслаивают, собирая эти части из листов железа, изолированных друг от друга. Этим достигается значительное уменьшение потерь на вихревые токи.

С таким расслоением стали мы уже встречались в § 11-4. В синхронных машинах из листовой стали собирается статор. Вращающийся ротор, напротив, делают обычно из сплошной стали, так как ротор вращается с такой же скоростью, как и вращающееся магнитное поле (в роторе магнитное поле постоянно).

Напротив, в машинах постоянного тока в неподвижном остове машины и в полюсах магнитный поток будет неизменным[1], а во вращающемся якоре сталь непрерывно перемагничивается (якорь вращается в постоянном магнитном поле). Поэтому в машинах постоянного тока их станина выполняется обычно из сплошной стали, а якорь собирается из отдельных листов.

В целях увеличения магнитного потока и уменьшения потерь на перемагничивание при изготовлении машин пользуются специальными сортами стали.

В электрическом машиностроении главным образом применяется кремнистая листовая сталь (так называемая электротехническая сталь), обладающая относительно малой проводимостью (что приводит к уменьшению вихревых токов) и малым гистерезисом.

В современных трансформаторах, изготовленных из хорошей стали, потери мощности очень малы. Это особенно важно, так как, прежде чем дойти до потребителя, электрическая мощность, как правило, проходит несколько раз через повышающие и понижающие трансформаторы.

---

[1] Медленные изменения магнитного потока, происходящие при изменении режима работы машин, не принимаются во внимание.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ОПАСНОСТЬ ОТ ТОКОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

13-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Оказывающий нам столько услуг электрический ток может оказаться причиной тяжелых поражений человеческого организма и даже смерти.

Человеческое тело представляет собой проводник электрического тока. Человеческий организм способен пропускать через себя лишь небольшие токи. Увеличение тока вызывает смерть.

При каком значении ток становится смертельным, сказать трудно. Ток в $^1/_{100}$—$^2/_{100}$ доли ампера вызывает болезненные судороги. Ток в $^5/_{100}$ долей ампера можно считать опасным для жизни. Ток в $^1/_{10}$ долю ампера надо считать, безусловно, смертельным. Понятно, что это лишь приблизительные цифры. Человеческое тело подчиняется закону Ома. Ясно, что опасность возрастает с увеличением напряжения.



Рис. 13-1. Предостерегающий плакат в установках высокого напряжения.

Чтобы подсчитать величину тока, который может пройти через оказавшегося под напряжением человека, надо знать чему равно его электрическое сопротивление. Но это— чрезвычайно изменчивая величина. Она зависит и от того, какое напряжение приложено к человеку и как долго протекает через него ток, от его душевного состояния — взволнован ли он или спокоен — и от ряда других причин.

Наибольшим сопротивлением обладает человеческая кожа. Но как раз здесь возможны наибольшие колебания величины сопротивления. Потная и сухая, грубая, тонкая, молодая или старая кожа оказывает различное сопротивление электрическому току.

Остается обратиться к опытным данным. Известны случаи, когда смертельным оказывалось напряжение в 110 *в*. Поэтому наши «Правила устройства электроустановок» требуют, чтобы при напряжениях, начиная уже от 12 *в*, были приняты меры против возможного прикосновения к токоведущим частям (устройство специальных ограждений и т. п.).

В худшем положении оказывается электротехнический персонал и в первую очередь монтеры, так как им зачастую приходится работать вблизи находящихся под напряжением устройств. Привычка притупляет бдительность. Благополучно окончившиеся прикосновения вселяют уверенность, что опасность преувеличивается. Посмотрим, насколько обоснована такая беспечность.

13-2. ИСТОЧНИКИ ОПАСНОСТИ

Для питания двигателей трехфазного тока очень часто применяется напряжение в 380 *в* между фазами, а следовательно, в 220 *в* между фазой и нейтралью. Нейтраль генератора (или трансформатора) обычно заземляется, т. е. присоединяется к проложенным в земле железным шинам или трубам (рис. 13-2).

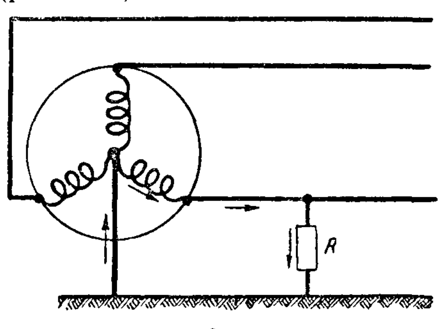


Рис. 13-2. Цепь тока при соприкосновении с рабочим проводом трехфазной системы с заземленной нейтралью.

Включим между одной из фаз и какой-нибудь заземленной точкой, например полом здания, сопротивление R. Получится замкнутая цепь, составленная из обмотки одной фазы генератора (или трансформатора), участка провода от начала фазы до места присоединения сопротивления, самого сопротивления и земли, которая является проводником тока.

В этой цепи действует фазовое напряжение генератора, а следовательно, по ней пройдет ток. Если сопротивление R много больше сопротивления остальных участков цепи, то можно считать, что напряжение генератора полностью уравновешивается падением напряжения в подключенном состоянии.

Предположим теперь, что этим сопротивлением является человеческое тело. Стоящий на полу человек прикоснулся к голому проводу. Тем самым он превратился в звено электрической цепи.

Если принять, что ток в 0,05 *а* представляет опасность для жизни, то этой опасности подвергнется человек, сопротивление тела которого будет равно $\frac{220}{0,05}=4\,400$ *ом*. Опыт показывает, что величина сопротивления человеческого тела может быть и ниже этой величины.



Рис. 13-3. Цепь тока при соприкосновении с рабочим проводом трехфазной системы с незаземленной нейтралью. Источник опасности — соприкосновение другого провода с землей.

Может показаться, что причиной опасности является заземление нейтрали генератора. Не будь его, прикосновение к проводу было бы вполне безопасно, так как через человеческое тело не замыкалась бы ни одна электрическая цепь.

Но присмотримся к изображенной на рис. 13-3 схеме Небрежный надзор привел к тому, что один из проводов оголился и касается водопроводной трубы. Это не помеха в работе: нейтраль не заземлена, и соприкосновение провода с «землей» не приводит к короткому замыканию.

Человек коснулся одного из «здоровых» проводов. Образовалась замкнутая цепь из водопроводной трубы («земли»), человеческого тела и не показанных на рисунке двух

фаз генераторной обмотки[1]. В этой цепи действует уже линейное напряжение, т. е. 380 *в*. Вместо того, чтобы уменьшить опасность, мы увеличили ее.

Значит, причиной опасности является недостаточный надзор за изоляцией линии. Усилим его. Правда, здесь нельзя положиться на обслуживающий персонал, так как провода могут проходить по недоступным для осмотра местам. Но контроль над целостью изоляции можно поручить вольтметрам. Схема рис. 13-4 показывает, что три вольтметра вполне успешно справляются с этой задачей.

В нормальных условиях работы вольтметры показывают фазовое напряжение линии. Нарушение целости изоляции в одной из фаз, т. е. соединение ее с землей, приведет к тому, что напряжение между «больным» проводом и землей сделается равным нулю. Стало быть, и присоединенный к этому проводу вольтметр также покажет нуль. Зато оба вольтметра, присоединенных к здоровым фазам, покажут теперь линейное напряжение.

В самом деле, генератор поддерживает между больным и любым из здоровых проводов линейное напряжение. Больной провод заземлен, следовательно, учитываемое вольтметрами здоровых фаз напряжение равно напряжению между здоровым и больным проводами, т. е. линейному.

Итак, дефекты изоляции будут обнаружены вольтметрами. Тогда их нетрудно найти и исправить.

Казалось бы, что прикосновение к проводу исправной линии с незаземленной нейтралью—вещь вполне безопасная.

Но это—заблуждение. Ведь при наличии емкости в цепях переменного тока ток может протекать и в разомкнутой цепи. Емкостные токи проводов могут замкнуться через человека.

Обратимся к схеме рис. 13-5. На ней показана однофазная линия, чтобы не усложнять без нужды картину. Явления в трехфазной системе будут вполне сходными.

Однофазная линия представляет собой систему, как бы состоящую из трех конденсаторов (в трехфазной линии их будет целых шесть); «обкладками» этих конденсаторов будут, во-первых, оба провода (этот конденсатор не пока-

---

[1] Предполагается, что обмотка соединена в звезду. Рекомендуем читателю убедиться, что дело не изменится при соединении генераторной обмотки треугольником.

зан на схеме), во-вторых, земля и первый провод и, в-третьих, земля и второй провод.

Человек прикоснулся ко второму проводу, включив сопротивление своего тела параллельно конденсатору (направления токов указаны на схеме стрелками). Человек опять оказался в цепи электрического тока, и чем длиннее линия, тем опаснее его положение.

Серьезную опасность представляют конденсаторы даже и в том случае, когда они отключены от источников напряжения. Дело в том, что конденсатор может сохранять заряды на своих обкладках и при том тем дольше, чем лучше изоляция между обкладками. Прикосновение человека к незаземленной обкладке равносильно его замыканию через сопротивление, и этим сопротивлением теперь будет человеческое тело. Как мы знаем (§ 5-8), в цепи будет протекать ток, начальное значение которого равно частному от деления остаточного напряжения конденсатора на величину сопротивления.

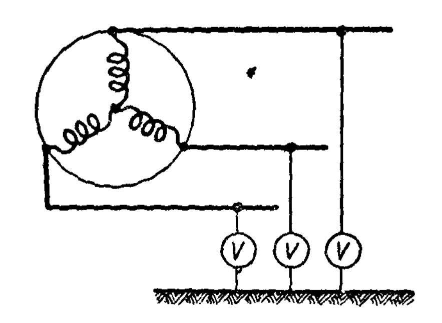


Рис. 13-4. Контроль состояния изоляции в трехфазной системе

Рис. 13-5. Емкостные токи линии замыкаются через прикоснувшегося к проводу человека.

Следует иметь в виду, что линии также могут сохранять остаточный заряд, величина которого тем больше, чем длиннее линия. Особенно велики заряды кабельных линий ввиду их большой емкости.

Мы не можем здесь перечислить все возможности поражения электрическим током. Поэтому мы настойчиво рекомендуем в точности соблюдать правила безопасности.

13-3. ЗАЩИТНЫЕ СРЕДСТВА

При работе под напряжением обязательно применение защитных средств — изолирующих подставок, диэлектрических ковриков, резиновых галош и перчаток. Их назначение — не допускать создания контура тока, включающего в себя тело человека.

Почему птица без всякого вреда для себя садится на провода линии, находящейся под высоким напряжением? Потому что при этом электрический ток не проходит через ее тело. Она приобретает высокий потенциал, но это еще не создает пути для тока. Другое дело, если крупная птица одновременно прикоснется своими крыльями к двум проводам линии. Такое прикосновение окажется, безусловно, смертельным, так как открылся путь току от одного провода к другому через тело птицы.

Посмотрим, что получится, если человек, стоя на резиновом коврике, касается находящейся под напряжением части установки? Создается цепь, состоящая из последовательно соединенных тела человека и коврика. Сопротивление коврика имеет величину порядка нескольких миллионов ом, т. е. намного больше сопротивления человека. Рабочее напряжение практически окажется приложенным к резиновой изоляции. Проходящий ток ничтожно мал.

Картина резко меняется при самом незначительном повреждении коврика, например при его проколе. Проводимость коврика увеличивается настолько, что в цепи будет протекать ток, опасный для жизни человека. Вот почему для всех защитных средств установлены периодические проверки.

СТЕПЕНИ ДЕСЯТИ

В электротехнике мы сталкиваемся с числами самых разных порядков Например, приходится измерять мощности огромных электростанций и очень малые мощности, рассеиваемые в проводах. Для изображения очень больших и очень малых чисел удобно пользоваться записью в виде произведения числа на степень десяти.

Если мы несколько раз множим само на себя одно и то же число, — это называется возведением в степень:

$a \cdot a = a^2$ (читается „a квадрат“ или „a во второй степени“), $a \cdot a \cdot a = a^3$ (читается „a куб“ или „a в третьей степени“).

Заметим, что все числа, состоящие из единицы и нулей, суть степени десяти. Действительно,

$$10 \times 10 = 100 = 10^2 \text{ (десять в квадрате);}$$

$$10 \times 10 \times 10 = 100 \times 10 = 1\,000 = 10^3 \text{ (десять в кубе);}$$

$$10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10\,000 = 10^4 \text{ (десять в четвертой степени).}$$

Так же точно можно записать, скажем, один миллион

$$1\,000\,000 = 10^6,$$

сто миллионов

$$100\,000\,000 = 10^8.$$

Ясно, что два миллиона — это два, умноженное на миллион, т. е. два миллиона запишем, как $2 \cdot 10^6$:

$$2\,000\,000 = 2 \cdot 1\,000\,000 = 2 \cdot 10^6;$$

теперь запишем мощность Волжской гидроэлектростанции — она равна 2 100 тысяч киловатт (2 100 000 *квт*):

$$2{,}1 \cdot 10^5 \text{ квт}$$

или в ваттах:

$$2{,}1 \cdot 10^9 \text{ вт.}$$

Совершенно аналогично записываются и очень малые числа. Что такое 0,1—одна десятая? Это единица, деленная на десять $\frac{1}{10}$, также сотая—это $\frac{1}{100}$ или $\frac{1}{10^2}$. Но такие числа в математике и технике принято записывать в виде степеней с отрицательным показателем, что прямо соответствует непосредственному расширению понятия степени. Вместо $\frac{1}{10}$ пишут 10^{-1}, также $\frac{1}{10^2} = 10^{-2}$; $\frac{1}{10^5} = 10^{-5}$ и т. д.

Если через электронную лампу течет ток в 90 *ма*, то этот ток в амперах равен 90 *ма* $= 90 \cdot 10^{-3}$ *а* $= 9 \cdot 10^{-2}$ *а*.

Запись в виде степеней десяти очень удобна для перемножения чисел, так как *при перемножении двух различных степеней*

одного и того же числа показатели степени алгебраически складываются:

$$10^3 \cdot 10^2 = 10^5;$$

$$10^4 \cdot 10^{-2} = 10^2.$$

Нужно перемножить, скажем, $4 \cdot 10^9$ и $6 \cdot 10^{-6}$; вычисление производится так:

$$4 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 6 \cdot 10^9 \cdot 10^{-6} = 24 \cdot 10^9 \cdot 10^{-6} = 24 \cdot 10^3 = 2{,}4 \cdot 10^4.$$

2. РЕШЕНИЕ ПРОСТЕЙШИХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Даны два соотношения между двумя неизвестными величинами x и y, выражаемые уравнениями

$$(1)\ a_1x + b_1y = c_1,$$

$$(2)\ a_2x + b_2y = c_2,$$

где буквами a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2 обозначены известные постоянные величины, называемые коэффициентами.

Неизвестные легко определить, например, пользуясь методом сравнения коэффициентов. Уравнение (1) множится на b_2, а (2) на b_1; этим выравниваются коэффициенты при y:

$$(1')\ a_1b_2x + b_1b_2y = c_1b_2;$$

$$(2')\ a_2b_1x + b_1b_2y = c_2b_1.$$

Вычитая (2′) из (1′), получим:

$$x\,(a_1b_2 - a_2b_1) = c_1b_2 - c_2b_1.$$

Из последнего уравнения

$$x = \frac{c_1b_2 - c_2b_1}{a_1b_2 - a_2b_1}.$$

Второе неизвестное y определится аналогично или путем подстановки найденного x в одно из заданных уравнений.

Аналогично решаются уравнения для трех, четырех и более неизвестных. Важно запомнить, что соотношений должно быть столько же, сколько неизвестных. Такие уравнения описывают процессы в линейных электрических цепях (§ 2-25).

Уравнение вида

$$\frac{a}{x} = \frac{b}{x} + c$$

легко приводится к линейному путем умножения на x:

$$a = b + cx.$$

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Ц

Ч

Ш

Э

Я